

И.А. РЫБЬЕВ

Строительное материаловедение



Строительное материаловедение: Учеб. пособие для строит. спец. вузов / И.А. Рыбьев. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2004. – 701 с.; ил.

ISBN 5-06-004059-3

В пособии впервые изложены основы фундаментальной науки прикладного характера, именуемой строительным материаловедением и состоящей из двух главных взаимосвязанных компонентов – теории и практики. Приводятся новейшие данные по структурообразованию материалов, их прочности, деформации и другим закономерностям общей теории, а также сведения по технологии производства и применению строительных материалов в их широкой номенклатуре.

Для студентов строительных специальностей вузов.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ТЕОРИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Глава 1

Общие сведения о строительном материаловедении

1.1. НЕКОТОРЫЕ ИСХОДНЫЕ ПОНЯТИЯ

Строительное материаловедение является фундаментальной наукой прикладного характера, которая представляет собой непрерывно развивающуюся систему знаний о строительных материалах и изделиях. Без достаточных знаний о многочисленных разновидностях строительных материалов, способах их производства и качественных показателях, методах правильного их хранения и использования невозможно проектировать и строить здания и сооружения, реконструировать или ремонтировать их, активно участвовать в деятельности научно-технических и конструкторских организаций строительного профиля. При решении научных и производственных задач всегда стремятся к улучшению качества и снижению себестоимости строительных материалов, а в архитектуре — и к повышению их художественной выразительности, а также к повышению надежности материалов, изделий и строительных конструкций, их долговечности в зданиях и инженерных сооружениях.

Строительное материаловедение, подобно многим другим наукам, содержит два основных компонента — практику и теорию. Структура строительного материаловедения весьма сложна, но в ней существует теснейшая взаимосвязь и взаимообусловленность этих двух ее компонентов.

Практика — приоритетная часть излагаемой ниже фундаментальной науки, представляет собой сумму знаний: о производстве строительных материалов и изделий; о технологических способах переработки (механической, химической) сырья с получением качественной готовой продукции; о технических характеристиках качества различных строительных материалов; о методах проверки их свойств в лабораторных и производственных условиях; о практическом использовании материалов и изделий при возведении зданий, инженерных сооружений и других строительных объектов. Уровень практики и ее успехи зависят от того, в какой мере она базируется на научных положениях (принципах), используются ли в ней современные достижения науки и техники, приняты ли эффективные основные элементы технологии (сырье, оборудование и энергетика) и, главное, в должной ли степени производство соответствует уровню прогрессивной технологии с учетом мировых достижений в данной отрасли.

В общих сметах строительного объекта на стоимость материалов обычно приходится 50—65%, поэтому экономия при возведении строительного объекта во многом зависит от эффективности применяемых строительных материалов и изделий, правильного выбора их для изготовления конструкций и специальных целей. В практике изыскиваются различные способы снижения себестоимости материалов, увеличения их эффективности за счет уменьшения материалоемкости и массы конструкций, выпуска строительных изделий и деталей повышенной заводской готовности, дальнейшего расширения ассортимента. Особое внимание практика уделяет соответствию материалов определенным эталонам и нормативам по внешнему виду, свойствам. Отступления от эталонов и соответствия ГОСТам может быть только в сторону повышения качества и художественно-эстетической выразительности (в архитектуре) конструкций.

Теория составляет сумму знаний о существенных связях, возникающих в процессах структурообразования и формирования свойств строительных материалов на стадиях практической технологии переработки сырья или использования готовой продукции в строительстве. Главным критерием достоверности теории является, как известно, практика, которая не только проверяет теорию, но и обогащает ее набором новейших

фактов. На основе их последующего анализа и систематизации теория может пополняться новыми закономерными связями. Последние становятся особо ценными, если относятся не только к единичному материалу, оставаясь специфической закономерностью (хотя обычно весьма значимой для конкретной практики), а к множеству материалов в их определенной совокупности, например подобных по своей структуре. Тогда для такого множества материалов закономерности становятся не частными, а общими. Выражаться они могут как в конкретной, так и в абстрактно-логической форме, например в виде математического уравнения. Определенный физический смысл уравнения позволяет находить методы дальнейшего совершенствования практики.

Теория строительного материаловедения раскрывает также сущность явлений и процессов, связанных с возникновением новообразований, микро- и макроструктурных элементов, их взаимосвязей при переработке сырья и формировании (медленном или быстром) единой структуры монолитного строительного материала или изделия в технологический период. В теории содержится и единая классификация многообразных строительных материалов, каждый из которых при соответствующих условиях подчиняется общим научным принципам и основным объективным закономерностям. В ней сосредоточены методы оптимизации состава и структуры материалов с обеспечением необходимых свойств, изложен комплекс общих научных принципов, лежащих в основе конкретных технологических переделов и составляющих сущность теоретической технологии. К теории также относятся гипотезы, теоремы, критерии и категории строительного материаловедения.

В строительном материаловедении кроме практики и теории, как основных компонентов, представлен и третий компонент — **мировоззренческие основы науки**. Они способствуют обоснованному прогнозированию развития практики, расширению и совершенствованию номенклатуры строительных материалов и изделий, классификации их в связи с применением новых разновидностей изготавливаемой продукции.

1.2. ИСТОРИЧЕСКИЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Наука о материалах имеет глубочайшую историю развития. Истоком ее служат первые истинные познания материалов в древности.

Условно можно выделить три основных по своей продолжительности не равных этапа в ее истории. Возникновение науки и каждый этап ее развития всегда были обусловлены производством, практикой. В свою очередь, развитие производства являлось следствием возрастающих потребностей в материалах у общества.

Первый этап охватывает наиболее длительный период. При необходимости в нем можно выделить более дробные подпериоды, например древнейшие и древние времена, средние и поздние века. Имеется достаточно оснований утверждать, что исходным моментом для становления науки о материалах явилось получение керамики путем сознательного изменения структуры глины при ее нагревании и обжиге.

Исследования раскопок показывают, что предки улучшали качество изделий вначале подбором глины, затем с помощью изменения режима нагревания и обжига на открытом огне, а позже — в специальных примитивных печах. Со временем чрезмерную пористость изделий научились уменьшать глазурованием.

О течением значительного времени человечество познало самородные, а затем и рудные металлы, крепость и жесткость которых были известны уже с 8-го тысячелетия до н.э. Холоднокованная самородная медь была вытеснена медью, выплавленной из руд, которые встречались в природе чаще и в больших количествах. В дальнейшем к меди стали добавлять другие металлы, так что в 3-м тысячелетии до н.э. научились изготавливать и использовать бронзу как сплав меди с оловом, а также обрабатывать благородные металлы, уже широко известные к тому времени. Масштабы использования металлов возрастали, и человечество вступило из бронзового века в железный, поскольку железные руды оказались доступнее медных. В 1-м тысячелетии до н.э. преобладало железо, которое научились соединять с углеродом при кузнечной обработке в присутствии древесного угля. Пока точно не установлено, когда началось применение термической обработки стали, но все же известно, что в IX и VIII вв. до н.э. жители Луристана (территория западного Ирана) использовали ее в быту и технике.

Сознательное создание новых керамических и металлических материалов и изделий было обусловлено определенным прогрессом производства. Возрастала необходимость в более глубоком понимании свойств материалов, особенно прочности, ковкости и других качественных характеристик, а также способов возможного изменения их. К этому времени развились мореплавание, ирригация, постройка пирамид, храмов, укрепление грунтовых дорог и т.д. Пополнились новыми сведениями и фактами теоретические представления о материалах.

Первыми и наиболее правдоподобными суждениями о сущности качества материалов и о слагающих частицах вещества были суждения древнегреческих философов Демокрита (около 460 или 470 до н.э.) и Эпикура (341—270 до н.э.). Их учения об атомизме возникли под влиянием наблюдений за состоянием и свойствами природных камней, керамики, бронзы и стали. Примерно к тому же времени, относится и философия древнегреческого ученого Аристотеля, который установил 18 качеств у материалов: плавкость—неплавкость, вязкость—хрупкость, горючесть—негорючесть и т.п. Три известных состояния вещества (твердое, жидкое и газообразное) и отношение их к энергии выражалось Аристотелем четырьмя элементами: землей, водой, воздухом и огнем, что с позиций физики являлось определенным достижением. Римский философ Тит Лукреций Кар (99—55 до н.э.) в дидактической поэме «О природе вещей» излагал свои суждения о природе свойств материалов: «...что, наконец, представляется нам затверделым и плотным, то состоять из начал крючковатых должно непременно, сцепленных между собой наподобие веток сплетенных. В этом разряде вещей, занимая в

нем первое место, будут алмазы стоять, что ударов совсем не боятся, далее — твердый кремль и железа могучего крепость, так же как стойкая медь, что звенит при ударах в засовы...»¹.

Для древнего периода науки весьма характерна нерасчлененность ее по отдельным видам строительных материалов. В значительной мере в ней прослеживается общая взаимосвязь между качеством материалов и их атомистическим составом, хотя, естественно, до подлинных научных химических знаний о составе и свойствах было еще весьма далеко. Теория строилась в основном на догадках, интуициях, хотя были и удивительные решения, например в III в. до н.э. уже умели придавать строительным растворам гидравлические свойства, т.е. способность к их твердению в водной среде с помощью природных добавок. Этим же специалисты занимаются до сих пор.

К первому периоду относится и средневековье с характерной для него алхимией. Именно в этот период Парацельс заменяет четыре элемента Аристотеля тремя своими — солью, серой и ртутью, что можно расценить как интуитивное предсказание роли межатомных связей в формировании свойств веществ. К этому периоду относится и учение Декарта (1596—1650) о том, что природа представляет собой непрерывную совокупность материальных частиц, что движение материального мира вечно и сводится к перемещению мельчайших частиц — атомов. Перемещение атомов или, как их тогда называли, корпускул, составляло основу корпускулярной теории строения вещества, что было значительным достижением в области познания составов, внутренних взаимодействий и свойств веществ. Исследования, связанные с изучением внутреннего строения (структуры) материалов, развивались медленнее, хотя у философов античного периода, как отмечалось выше, были и теории, и некоторые опытные данные. Среди наиболее выдающихся работ следует назвать публикацию Реомюра (1683—1757) о структуре (в современной терминологии — о микроструктуре) железа и ее изменениях. Опыты завершились получением нового материала — ковкого чугуна. В первых книгах по материаловедению Бирингуччо (1480—1539) и Агриколы (1494—1555) суммировались эмпирические сведения о сущности операций, выполняемых в литейном и кузнечном производствах, о плавлении руд и характере металлургического производства. Следует отметить, что к периоду средневековья относится также учреждение в Москве в 1584 г. «Каменного приказа» о камне, кирпиче и извести в связи с применением их в строительстве, который сыграл положительную роль.

Большой вклад в развитие науки о материалах был внесен гениальными русскими учеными М.В. Ломоносовым и Д.И. Менделеевым.

М.В. Ломоносов (1711—1765) заложил основы передовой русской философии и науки, особенно в области химии, физики, геологии. Он явился основоположником курса физической химии и химической атомистики, обосновывающей атомно-молекулярное строение вещества. В 1752 г. им было написано «Введение в истинную физическую химию». Касаясь распространенной в тот период корпускулярной теории, М.В. Ломоносов отмечал, что корпускулы — это мельчайшие частицы, ввел представление о молекулах и их отличии от атомов, а относительно еще более распространенного тогда учения о флогистоне, выделяющемся, якобы, при прокаливании металлов и горении веществ, то он не только отверг такое учение о таинственном «веществе огня», но и дал научное объяснение химическим явлениям, протекающим при таких воздействиях огня. Кроме того, М.В. Ломоносов впервые написал книгу на русском языке по металлургии, разработал составы цветных стекол и способ изготовления мозаичных панно из них, высказал гипотезу о происхождении янтаря и др.

Д.И. Менделеев (1834—1907) открыл важнейшую закономерность природы — периодический закон, в соответствии с которым свойства элементов находятся в периодической зависимости от величины их атомной массы. Он опубликовал книгу

¹ Лукреций Тит Кар. О природе вещей / Пер. Ф.А. Петровского. М., 1958.

«Основы химии»; в ней описано, в частности, атомно-молекулярное строение вещества. Д.И. Менделееву принадлежит и публикация по основам стекольного производства.

Для первого этапа становления и развития строительного материаловедения, который, как отмечалось, начался с глубокой древности и продолжался до начала второй половины XIX в., характерно сравнительно ограниченное количество разновидностей материалов и опытных данных по их качественным характеристикам. Однако великие ученые и философы тех времен с помощью интуиции и логики, гипотез и теорий, а несколько позже — с привлечением новых знаний в физике и открытий в химии и физической химии (последняя свое поступательное развитие начала с работ М.В. Ломоносова) сумели дать достаточно полное представление о составе веществ, внутренних взаимодействиях мельчайших частиц и свойствах. Были установлены некоторые общие зависимости свойств веществ, особенно механических, от их состава. Менее изученной оставалась зависимость свойств от структуры, хотя еще в 1665 г. английский ученый Роберт Гук выявил у металлов типичную кристаллическую структуру, т.е. за 200 лет до открытия микроструктуры стали под микроскопом английским ученым Генри Сорби.

Второй этап развития строительного материаловедения условно начался со второй половины XIX в. и закончился в первой половине XX в. Важнейшим показателем этого этапа явилось массовое производство различных строительных материалов и изделий, непосредственно связанное с интенсификацией строительства промышленных и жилых зданий, общим прогрессом промышленных отраслей, электрификацией, введением новых гидротехнических сооружений и т.п. Характерным является также конкретное изучение составов и качества производимых материалов, изыскание наилучших видов сырья и технологических способов его переработки, методов оценки свойств строительных материалов со стандартизацией необходимых критериев совершенствования практики изготовления продукции на всех стадиях технологии.

Второй этап отличается сравнительно быстрым ростом производства новых материалов, ранее отсутствовавших в номенклатуре. Достижения науки о материалах в нашей стране исходят от основоположников крупнейших научных школ Ф.Ю.Левинсона-Лессинга, Е.С. Федорова, В.А. Обручева, А.И.Ферсмана, Н.А. Белелюбского, занимавшихся исследованием минералов и месторождений природных каменных материалов (горных пород). В результате строительное материаловедение обогатилось данными петрографии и минералогии при характеристике минерального сырья, используемого после механической переработки либо в сочетании с химической переработкой в виде готовой продукции — природного камня штучного и в рыхлом состоянии, керамики, вяжущих веществ, стекла и др. С той же целью начали применять побочные продукты производств — шлаки, золы, древесные отходы и пр.

В номенклатуре материалов, кроме применявшихся на первом этапе камня немолотого или грубо околотого, меди, бронзы, железа и стали, керамики, стекла, отдельных вяжущих, например гипса, извести, появились новые цементы, и начался массовый выпуск портландцемента, открытого Е. Челиевым в начале XIX в. В разработке новых для того времени минеральных вяжущих веществ участвовали А.Р. Шуляченко, И.Г. Малюга, А.А. Байков, В.А. Кинд, В.Н. Юнг, Н.Н. Лямин и другие ученые. Улучшилось качество и издревле известных извести и гипса. Так, И.В. Смирнов предложил использовать в строительстве молотую негашеную известь, в то время как в течение двух тысячелетий известь применялась после ее гашения водой; И.А. Передерни предложил высокопрочный гипс; А.В. Волженский при участии А.В. Ферронской — гипсоцементно-пуццолановое вяжущее; П.П. Будников — ангидритовый цемент и др. Быстро развивалось производство цементных бетонов различного назначения; сформировалась специальная наука о бетонах — бетоноведение. В 1895 г. И.Г. Малюга издал первый в нашей стране труд «Состав и способы приготовления цементного раствора (бетона) для получения наибольшей крепости». Он впервые вывел формулу прочности

бетона и сформулировал так называемый закон водо-цементного отношения. Несколько раньше французский ученый Фере предложил формулу прочности цементного камня (и бетона). В 1918 г. была установлена прочность бетона Абрамсом (США), уточненная Н.М. Беляевым, что послужило исходной позицией для разработки метода подбора (проектирования) состава плотного и высокопрочного бетона. Появилась и формула прочности Боломея (Швейцария), уточненная Б.Г. Скрамтаевым применительно к отечественным исходным компонентам.

Аналогичный процесс обновления и интенсификации производства с одновременным развитием соответствующих наук на этом этапе произошел и в отношении многих других материалов. Так, например, на основе извести и портландцемента осуществлялся массовый выпуск разновидностей смешанных цементов и вяжущих веществ. Последующие исследования Н.М. Беляева, И.П. Александрина, Б.Г. Скрамтаева, Н.С. Завриева и других ученых способствовали существенному повышению качества бетона с уточнением ранее полученных зависимостей его прочности (Абрамсом, Боломеем). К этому же времени Н.А. Попов разработал научные основы технологии легких бетонов и строительных растворов, объемы применения которых быстро возрастали, особенно в жилищном строительстве. Были предложены новые разновидности искусственных заполнителей для легких бетонов — керамические, шлаковые и др.

В конце XIX в. формируется технология изготовления железобетона и получает развитие наука о железобетоне. Этот высокопрочный материал был предложен французскими учеными Ламбо и Ко-валье, садовником Монье (1850—1870). В России А. Шиллер, а затем в 1881 г. Н.А. Белелюбский провели успешные испытания конструкций из железобетона, а в 1911 г. были изданы первые технические условия и нормы для железобетонных конструкций и сооружений. Особого внимания заслужили безбалочные железобетонные междуэтажные перекрытия, разработанные в Москве А.Ф. Лолей-том (1905). В конце XIX в., после успешных исследований, внедрен в строительство предварительно напряженный железобетон. В 1886 г. П. Джексон, Деринг, Мандель, Фрейсине взяли патент на его применение и развили этот метод. Массовое производство преднапряженных конструкций началось несколько позже, а в нашей стране — на третьем этапе развития строительного материаловедения. К этому периоду относится внедрение и сборного железобетона. Развивались научные концепции производства многих других строительных материалов. Уровень познания поднялся так, что в цементной, полимерной, стекольной и некоторых других отраслях разрыв во времени между окончанием научной разработки и внедрением ее в производство становился весьма малым, т.е. наука превращалась в непосредственную производительную силу.

В нашей стране, как и в других развитых странах, создавались отраслевые научные институты — НИИЦемент, НИИЖелезобетон, НИИСтройполимер, НИИАсбестоцемент, НИИКерамика, НИИ-Минерального сырья и др. Периодически собирались национальные и международные конгрессы по проблемам дальнейшего совершенствования технологий и повышения качества традиционных и новых материалов. В них остро нуждалось жилищное, промышленное, гражданское, дорожное, гидротехническое, сельскохозяйственное и другие виды строительства. Развитие практики на этом этапе в строительном материаловедении было в известной мере гипертрофировано по сравнению с теорией. Раскрытие теоретических принципов и общих закономерностей сдерживалось необходимостью быстрее решения проблемы интенсификации производства строительных материалов и изделий для удовлетворения острой нужды в них в этот трудный период времени.

Гипертрофирование практики выразилось, в частности, в том, что фундаментальная наука о материалах именовалась как «Строительные материалы» с достаточно подробным описанием в них производимых материалов и изделий, но, как правило, вне связи между собой. Под этим названием издавались учебники для студентов высших и средних специальных учебных заведений. Одним из первых массовым тиражом в 1896 г. вышел в

свет учебник В.В. Эвальда, переиздававшийся затем 14 раз под названием «Строительные материалы, их изготовление, свойства и испытания». Далее следовали аналогичные учебники «Строительные материалы», подготовленные В.А. Киндом и С.Д. Окороковым (1934 г.), Б.Г. Скрамтаевым, Н.А. Поповым и др. (1950 г.), В.А. Воробьевым (1952 г.), А.Г. Комаром (1967 г.), а также другими авторами с неоднократным их переизданием. Несомненно, эта учебно-методическая литература сыграла и продолжает играть свою роль главнейших систематизированных пособий в изучении научной практики производства строительных материалов и изделий, научных основ их качества и широкого применения в строительстве.

Третий этап охватывает период со второй половины XX в. до настоящего времени. Он характеризуется, во-первых, процессом дальнейшего расширения производства строительных материалов и углублением соответствующих им специализированных наук и, во-вторых, — интеграцией научных знаний о строительных материалах и изделиях в их сложной совокупности. Расширение производства материалов вызывалось по-прежнему необходимостью восстановления жилищного и промышленного фонда после второй мировой войны. Строительство было переведено на индустриальные способы, в частности, путем заводского изготовления изделий из железобетона, конвейеризации производства сборного бетона и железобетона. Если в 1950 г. в нашей стране было изготовлено 1,3 млн. м³ сборного железобетона в виде панелей и блоков, то в 1960 г. — 30,2 млн. м³, в 1970 г. — 84,6 млн. м³, в 1980 г. — 122 млн. м³, в 1985 г. — 151,0 млн. м³, из которых почти 30 млн. м³ — предварительно напряженных сборных железобетонных конструкций. Увеличивались объемы выпуска изделий и конструкций из легких и ячеистых бетонов (в 1985 г. — 25 млн. м³).

Соответственно быстро возрастала мощность цементной промышленности. Если в 1950 г. выпуск цемента составил 10,2 млн. т., то в 1960 г. — 45,5, в 1970 г. — 96, в 1980 г. — 125, а в 1985 г. — 131 млн. т. Количество разновидностей цемента составило 30. Высокий уровень развития этой промышленности был также и во многих других странах.

Керамическое производство стало высокомеханизированной и автоматизированной отраслью в промышленности строительных материалов. Во второй половине XX в. годовая производительность одной технологической линии составляла на заводах до 30 млн. шт. стандартного кирпича. Были внедрены поточно-конвейерные линии с годовой производительностью до 1 млн. м² облицовочных керамических плиток и до 800 тыс. м² плиток для полов.

В стекльной промышленности выпуск листового стекла также быстро увеличивался: в 1950 г. — 77, в 1960 г. — 147, в 1970 г. — 231, в 1980 г. — 245 млн. м². Действовали механизированные линии по изготовлению стеклопрофилита.

Ежегодно нарастал объем выпуска полимерных материалов повышенной термостойкости, прочности и негорючести, долговечности и стабильности, многих других строительных материалов и изделий. Рост производства сопровождался развитием и специализированных наук, их прогрессом. Существенный вклад в развитие специализированных направлений науки о строительных материалах и изделиях, а также в совершенствование их производства и повышение качества в нашей стране внесли П.П. Будников, П.И. Боженов, Ю.М. Бутт, И.И. Верней, Ю.М. Баженов, А.В. Волженский, И.Н. Ахвердов, В.А. Воробьев, Г.И. Горчаков, В.Д. Глуховский, И.А. Иванов, Г.И. Книгина, В.Г. Микульский, В.В. Михайлов, В.М. Москвин, Л.М. Перельгин, И.А. Рыбьев, П.В. Сахаров, П.Н. Соколов, В.В. Тимашев, А.Я. Тихонов, И.М. Френкель, А.Е. Шейкин, С.В. Шестоперов, М.И. Хигерович, В.М. Хрулев, В.И. Харчевников и др. Большой научный и практический вклад на современном этапе строительного материаловедения внесли многие зарубежные специалисты.

Процесс специализации наук о строительных материалах продолжался. Возникли стыковые области познания комплексных материалов, например полимерцементных, силикатопolyмерных, шлакокерамических и многих других. Это существенно обогащало

практику строительного материаловедения, отрасли промышленности строительных материалов и изделий.

Третий этап строительного материаловедения характеризовался не только развитием практики, но и теории, систематизацией теоретических знаний о материалах в их сложной совокупности и взаимосвязи. Были установлены общие закономерности в свойствах искусственных и природных материалов оптимальной структуры, общие научные принципы в технологиях различных материалов, общие методы оптимизации их структуры, обобщенные критерии (качественные и количественные) прогрессивных технологий и др.

Первые обобщения в науке о материалах выразились в разработке Д.С. Белянкиным (1876—1953) технической петрографии с получением огнеупоров, абразивов и некоторых других искусственных камней. Новым импульсом развития материаловедческой науки на третьем этапе стала физико-химическая механика — пограничная наука между физической химией и механикой, разработанная П.А. Ребиндером при участии большой группы ученых (в том числе вузов), отмеченных АН СССР, — Н.А. Попова, А.Н. Попова, Г.И. Логтинова, М.Л. Воляровича, Н.Н. Иванова, И.А. Рыбьева, К.Ф. Жигача, Д.М. Толстого, Г. Д. Диброва, Б.В. Веденеева, Е.Е. Сигаловой, Л.А. Казаровицкого, Л.П. Орендлихер и др. В этой области науки показаны основы управления технологическими процессами получения различных строительных и конструкционных материалов с заданными свойствами, высокой надежностью и долговечностью. Определены условия эффективного дробления и тонкого измельчения, резания и механической обработки твердых тел с учетом воздействия окружающей среды. Направленностью к обобщениям и интеграции в науку о материалах отличаются исследования О.П. Мчедлова-Петросяна, П.И. Боженова, А.В. Нехорошева, П.Г. Комохова, В.И. Соломатова, В.И. Харчевникова и др.

С начала второй половины XX в. возникла и получила последующее развитие теория искусственных строительных конгломератов как «важнейший компонент современного строительного материаловедения»¹. Она была разработана И.А. Рыбьевым и его научной школой. В ней изложены: сущность теоретической технологии; научные принципы формирования оптимальных структур, при которых материалы становятся подобными между собой экстремальными значениями структурочувствительных свойств; общие и притом объективные (т.е. встречающиеся в природе, например у горных пород, древесины) закономерности изменения свойств (закон створа, закон конгруэнции, закон прочности и некоторых других свойств) в математических выражениях; основные аспекты долговечности материалов; теория методов (методология) научного исследования и технического контроля качества и т.п. (см. ниже 1.3).

Третий компонент, присутствующий в науках в виде основ мировоззрения, имеется, естественно, и в данной науке о материалах. Здесь он отличается от других компонентов (практики и теории) не только своей философской направленностью, выражающейся в научно-абстрактных законах этой фундаментальной строительной науки, но и специфическими тенденциями ее развития: углубление дифференцированных знаний о каждом строительном материале и синтез научных знаний о материалах в их сложном и систематизированном единстве. В этом единстве обеих тенденций заключена одна из эффективных внутренних сил поступательного развития строительного материаловедения с разработкой и доказательством новых гипотез и закономерностей, с прогнозированием будущих успехов в практике и теории.

¹ Российская архитектурно-строительная энциклопедия. М., 1995.

1.3. ТЕОРИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ

В строительном материаловедении, подобно другим наукам, примат принадлежит практике. Однако для эффективного изучения этой фундаментальной науки более целесообразно изложение теории в книге предпослать практике, что упрощает процесс познания технологий материалов в их многообразии. На современном, третьем, этапе развития строительного материаловедения теоретические аспекты науки наиболее полно пока изложены в теории искусственных строительных конгломератов¹. Ее принято начинать с изложения единой классификации, в которой эти материалы (кроме природных, описываемых отдельно) объединены законами общей теории и методологией.

¹ Эта теория в дальнейшем называется «Теория ИСК».

1.3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Огромное количество строительных материалов, наименования которых составляют многообразную их номенклатуру, обычно представляют в виде системных классификаций. В качестве классификационных признаков выбирают: производственное назначение материалов; вид исходного сырья; способ массового изготовления продукции; основной критерий качества и др. Одна часть материалов, объединенных в группы, относится к природным, а другая — к искусственным (рис. 1.1)¹.

Природные, или естественные, строительные материалы и изделия получают непосредственно из недр земли или путем переработки лесных массивов в «деловой» лес. Этим материалам придают определенную форму и рациональные размеры изделиям, но не изменяют внутреннего их строения, состава, например химического, вещественного. Чаще других из природных используют лесные (древесные) и каменные материалы и изделия. Кроме них в готовом к употреблению виде или при простой (механической) обработке можно получить: природный битум или асфальт, озокерит, казеин, кир; некоторые продукты растительного происхождения, например солому, камыш, костру, торф, лузгу и другие, или животного мира, например шерсть, коллаген, боннскую кровь и пр. Все эти природные продукты в сравнительно небольших количествах тоже используют в строительстве.

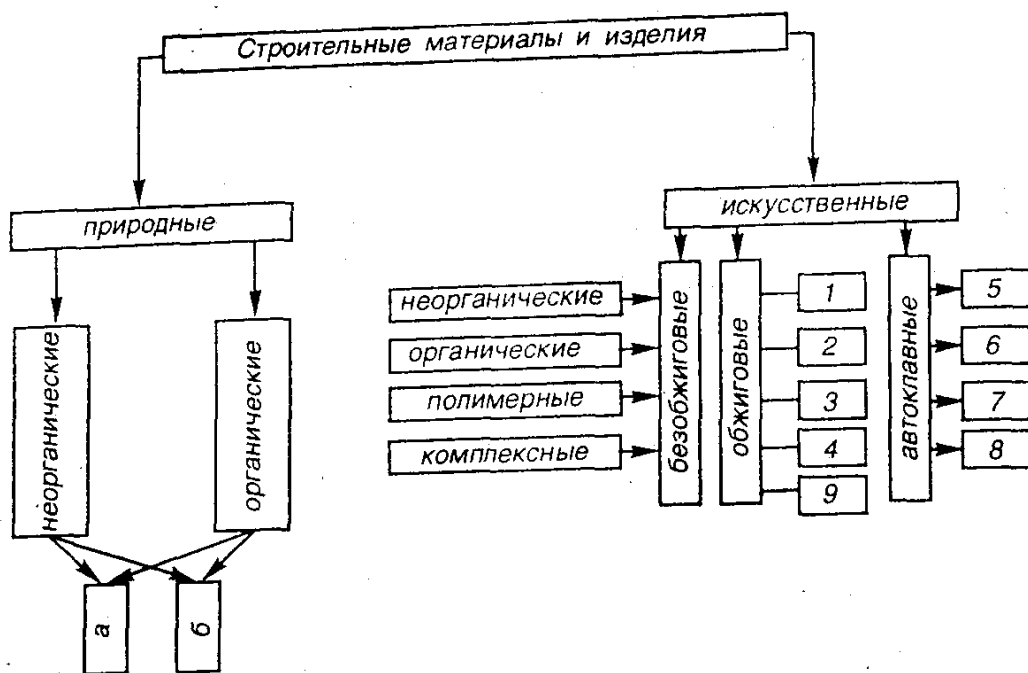


Рис. 1.1. Схема классификации строительных материалов:

1 – керамика; 2 – стекло; 3 – шлаки; 4 – каменные расплавы; 5 – кирпич; 6 – бетоны; 7 – асбестоцементные изделия; 8 – другие изделия; 9 – футеровочная обработка; а – материалы; б – изделия

Для лучшей систематизации природных строительных материалов их разделяют на классы по сходным признакам, в классах по разновидностям пород или изделий. Так, лесные материалы и изделия по породам подразделяют на лиственные и хвойные, по признаку ассортимента — на круглые, пиленные и штучные. Имеется и дальнейшее их подразделение, например по свойствам, структуре и др. Природные каменные материалы и изделия имеют свою классификацию (см. гл. 8), в основу которой положен генетический признак, т.е. происхождение горных пород. Их разделяют также по признаку технических

¹ Подробно см. в [19, 39].

свойств — средней плотности, прочности, морозостойкости; по химическому составу, например по содержанию кремнезема, — кислые, средние, основные и ультраосновные. Большое значение в строительстве имеют горные породы вторичного происхождения — осадочные, а среди них — природные конгломераты, брекчии, песчаники и др. Так были названы осадочные горные породы, которые образовались в результате цементации скопления гальки, гравия, песка и других природным вяжущим веществом. Практическое значение этих пород невелико, однако характерная их структура (вяжущее цементирует рыхлый минеральный материал) является самой распространенной в ИСК структуры бетонов.

Искусственные строительные материалы, находящиеся в тесной взаимосвязи между собой, разделяют по главному признаку их отвердевания: 1) материалы, отвердевание которых происходит при обычных, сравнительно невысоких температурах с кристаллизацией новообразований из растворов, а также материалы, отвердевание которых происходит в условиях автоклавов при повышенных температуре (175—200°C) и давлении водяного пара (0,9—1,6 МПа). Условно те и другие материалы относят нередко к безобжиговым материалам. Часто выделяют автоклавные материалы в самостоятельную группу; 2) материалы, отвердевание которых происходит в основном при остывании огненно-жидких расплавов, выполняющих в структуре функцию вяжущего вещества, или цемента высоких температур. Их нередко относят к обжиговым материалам. Выделение этих двух-трех типов из многообразия материалов является условным потому, что не всегда возможно определить четкую границу между ними, так же как между отвердевающими растворами и расплавами. Нередко отвердевание происходит при совмещенных процессах кристаллизации и остек-ловывания растворов и расплавов. Условность указанного деления выражается еще и в том, что в безобжиговых конгломератах применяют обычно обжиговые вяжущие вещества, например портландцемент, известь, гипс и др.

В конгломератах безобжигового типа цементирующие вяжущие представлены неорганическими, органическими, полимерными и комплексными веществами, а в ИСК обжигового типа цементы высоких температур (по выражению А.А. Байкова) представлены расплавами керамическими, шлаковыми, стекломассовым, каменным литьем и комплексными.

К неорганическим вяжущим веществам относят клинкерные и клинкерсодержащие цементы, гипсовые, магнезиальные и др.; к органическим — битумные и дегтевые вяжущие вещества, производные от них, — эмульсии, пасты; группу полимерных веществ представляют термопластичные и термоактивные с последующим более дробным подразделением. Комплексные включают смешанные, компаундированные и комбинированные вяжущие вещества. К смешанным относятся неорганические вяжущие вещества, получаемые путем тщательного смешения двух или нескольких их разновидностей, с порошкообразными добавками или без них; к компаундированным — сплавы, или механические смеси нескольких органических материалов; под комбинированными понимают объединение вяжущего неорганического с органическим или полимерным.

Цементирующая часть обжиговых конгломератов разделяется: на шлаковые расплавы — по химической основности исходного сырья (шлака); керамические расплавы — по характеру и разновидности использованной глины и других компонентов сырья; стекломас-совые расплавы — по показателю щелочной шихты; каменное литье — по виду, горной породы, поступающей на расплав; комплексные расплавы — по виду соединяемых компонентов: шлакокерамические, стеклошлаковые и др.

Единая классификация включает широкую сеть ответвлений конгломератных строительных материалов как от вяжущих веществ, так и от расплавов (цементов высоких температур) в связи с применением в них различных заполняющих материалов.

Из клинкерных и клинкерсодержащих цементов изготовляют бетоны, строительные растворы, арболиты и фибролиты, бетоны с полимерным зернистым заполнителем, асбестоцементные материалы и изделия; из гипса — гипсобетоны, арболиты и др.; из магнезиальных вяжущих — фибролиты и ксилолиты; из извести — силикатные бетоны и изделия и строительные растворы; из жидкого стекла — жаростойкие легкие бетоны, кислотоупорные бетоны и др. Получаемые конгломераты подразделяются в свою очередь по средней плотности — на особо тяжелые, тяжелые, легкие и особо легкие (ячеистые) бетоны; по производственному назначению — на конструкционные, конструкционно-теплоизоляционные, теплоизоляционные, гидротехнические, дорожные, жаростойкие и т.п. Разделение этих конгломератов возможно и по другим признакам.

Органические вяжущие вещества позволяют получать конгломераты, отличающиеся по температуре их применения в строительстве, — горячие, теплые и холодные асфальтовые бетоны; по удобооб-рабатываемости — жесткие, пластичные, литые и др.; по размеру частиц заполнителя — крупнозернистые, среднезернистые, мелкозернистые, песчаные.

Полимерные вяжущие вещества — важные компоненты при изготовлении полимербетонов, строительных пластмасс, стеклопластиков и др., нередко называемых композиционными материалами.

На основе комплексных вяжущих получают конгломераты типа бетонов, например гипсоцементнопуццолановые (ГЦП) бетоны и растворы, полимерцементные и силикатоплимерные бетоны и др.; мастики, в том числе герметизирующие — твердеющие и нетвердеющие, горячие и холодные; другие строительные материалы с конгломератным типом структуры.

Обжиговые конгломераты классифицируют по использованию в них расплавов как связующих компонентов. Следует отметить, что эта часть классификации имеет много пока неоткрытых, неизвестных материалов (их места в классификации условно показаны в виде свободных клеток). Перспективными являются конгломераты, которые должны быть получены на основе керамической связки. Среди них уже известны керамобетоны. Изучаются конгломераты на основе стеклосвязки с использованием тугоплавких гранулированных заполнителей и добавочных веществ; шлаколитные бетоны с заполнителями типа термозитов, агломерированных зол и др., бетонов со связкой из расплавов золы, например ТЭЦ, сланцевых; камнебетоны — на основе связи из литья с применением в них огнеупорных заполнителей.

Более ограниченное применение в строительстве находят материалы без крупных и мелких заполнителей; их можно отнести к микроконгломератам — цементный камень, асфальтовое вяжущее вещество, мастики, каменный расплав и др.

Классификация ИСК, объединяемая общей теорией, расширяется с появлением новых вяжущих веществ, разработкой новых искусственных заполнителей, новых технологий или существенной модернизацией существующих, созданием новых, в том числе комбинированных, структур. Соответствующие разновидности новых конгломератов заполняют свободные клетки классификации, количество которых неограниченно [39].

1.3.2. СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ИСК

Общая теория ИСК состоит из четырех взаимосвязанных разделов, каждый из которых представляет собой в достаточной мере самостоятельную научную систему, или теоретическую концепцию.

Первый раздел — теория структурообразования, может быть определен и как теоретическая технология. В этом разделе содержится описание типичных технологических процессов и переделов при производстве строительных материалов, закономерностей, лежащих в основе технологий в каждой отрасли материалов и изделий с учетом мировых достижений.

Второй раздел — структурная теория прочности, деформированности и конгруэнции свойств ИСК при оптимальных структурах. В нем изложен общий метод проектирования оптимальных составов и структур ИСК, опирающийся на объективные закономерности прочности и других свойств, конгруэнции, створа; раскрывается физическая, физико-химическая и технологическая природа этих объективных закономерностей материального мира.

Третий раздел — теория долговечности ИСК в конструкциях зданий и сооружений. Выражены закономерные изменения в структуре и свойствах материала, работающего в конструкциях. Излагаются принципы долговечности, временные элементы и способы их увеличения — упрочнение, относительная стабилизация и деструкция и ее торможение. Решаются проблемы прогнозирования долговечности и надежности ИСК в эксплуатационных условиях.

Четвертый раздел — теория методов научного исследования и технического контроля качества ИСК. Выражает совокупность приемов и операций в теоретическом познании качественных характеристик ИСК, закономерностей, лежащих в основе методов испытания материалов при оценке их свойств в лабораторных и производственных условиях разрушающими и адеструктурными методами измерения, приборами, аппаратами и автоматизированными средствами. Углубляет ускоренные методы, в частности, при оценке экологической чистоты материалов и окружающей среды.

Степень разработанности определенных разделов общей теории ИСК в настоящее время неодинакова, но объем имеющихся данных позволяет решать многие технологические и строительные задачи, проблемы совершенствования и развития науки о материалах. Ниже более подробно изложены основные аспекты этих четырех разделов.

Теория структурообразования и оптимизации структуры ИСК (теоретическая технология)

2.1. СЫРЬЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОСТУПАЮЩИЕ НА ПЕРЕРАБОТКУ В ИСК

Технология — наука о процессах и способах переработки используемых сырьевых продуктов. Химическая технология — наука о методах и процессах химической переработки сырья в строительные материалы и изделия. Основными элементами технологий являются сырье, энергия и аппаратура (оборудование). Эти элементы тесно взаимосвязаны и обусловлены экономикой, состоянием и уровнем научно-технического потенциала.

Сырьем служат исходные вещества или смеси различных веществ (сырьевые смеси), состоящие из двух или большего количества компонентов, которые поступают в химическую переработку для получения определенной разновидности строительного материала. Чаще для этих целей используют природное сырье. Оно добывается из недр земли или из ее поверхностных слоев, являясь в основном неорганическим. В меньших размерах для этих целей применяют органические природные вещества, а также побочные продукты промышленности, сельского хозяйства, лесосек и др.

Неорганическое сырье разделяют на неметаллическое и металлическое. При производстве строительных материалов преимущественно применяют неметаллическое, а в металлургии и, в частности, при изготовлении металлических строительных изделий и конструкций — металлическое сырье. Из неметаллического природного сырья чаще используют горные породы и породообразующие минералы, особенно оксиды, силикаты, карбонаты и другие сравнительно однородные по составу и свойствам природные вещества. Из оксидов особо выделяют воду с ее специфическими свойствами, отличающимися ее от оксидов металлов и металлоидов. Среди горных пород чаще других используют кремнеземистые — кварцевые пески, песчаники и другие, содержащие в своем составе кремнезем SiO_2 ; глиноземистые — глины, бокситы и другие, в состав которых входит глинозем Al_2O_3 ; карбонатные — известняки, мел, магнезиты, мраморы и другие, содержащие углекислый кальций CaCO_3 ; сульфаты и другие кислородные соли, например гипсы, ангидриды.

Из органических природных видов сырья следует отметить каменные и бурые угли, нефть, растительные вещества, торф и другие, как правило, неоднородные по своему составу и с содержанием различных соединений углерода вещества (кроме соединений карбонатов и карбидов, не относящихся к органическим веществам).

В качестве сырья используют и побочные продукты от других производств: шлаки металлургического процесса, золы от сжигания каменного угля и кокса, горелые породы, отходы горно-обогатительных комбинатов, древесную стружку и опилки, костру и др. Особенно много побочных продуктов (отходов) возникает в технологии минеральных строительных материалов. Динамика изготовления • этих материалов позволяет прогнозировать, по данным П.И. Боже-нова, объем отходов в России. Для получения 1 т алюминия требуется перерабатывать до 10 т сырья, то же — при производстве никеля, меди. Или, к примеру, один из ГОКов КМА в результате обогащения железосодержащих руд ежегодно перерабатывает около 80 млн. т руды, причем более 45 млн. т отходов складывается в отвалах. При обогащении асбестовых руд ежегодно имеется свыше 27 млн. т отходов в виде мелкого щебня, пригодного для строительных целей. Побочные продукты, используемые в строительстве, могут быть не только в твердом, но также в жидком и газообразном состояниях. Проблема их интенсивного использования в стройиндустрии весьма актуальна. В России в отвалах, по данным на начало 90-х годов, и

в хвостохранилищах накопилось до 60 млрд. т техногенных материалов, которые наносят вред окружающей среде в экологическом отношении.

Сырьевые природные продукты и техногенное сырье используют в производстве строительных материалов и изделий после их предварительной обработки. Последняя составляет важнейший этап подготовительных работ в технологиях.

2.2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При изготовлении строительных материалов и изделий сырье подвергают комплексу механических, химических, физико-химических тепловых и других воздействий. В результате реализации и определенной последовательности этих технологических воздействий сырье либо изменяет только форму и размеры частиц вещества, получает большую однородность и очищается от загрязнений, либо претерпевает существенные изменения состава, внутреннего строения и качественных характеристик.

Каждая разновидность строительных материалов и изделий нуждается в специфической технологии. Последняя выражается своим регламентом, параметрами режимов, минимальным размером затрачиваемой энергии и сырьевых ресурсов, достижением экономически эффективных результатов и высоких показателей качества готовой продукции. Необходимо соблюдение непрерывности (поточности) технологического процесса, хотя иногда может оказаться более целесообразной и периодичность, особенно в химической технологии.

При большом разнообразии специфических технологий материалов и изделий они содержат и ряд типичных операций (переделов). Это связано с тем, что в их основе лежат одинаковые физические или физико-химические зависимости, сходные кинематические схемы действия оборудования и машинного парка, общие методы использования тепловой или иного вида энергии и т.п. К типичным переделам, предопределяющим процессы структурообразования у материалов и изделий, относятся: *основные* — подготовительные работы; перемешивание отдозированных сырьевых компонентов; формование получаемой смеси (массы) и уплотнение отформованных изделий; специальная обработка уплотненных изделий до полного их отвердевания; технический контроль качества готовой продукции; *вспомогательные* — контроль за кондицией технологического регламента; транспортирование сырья и перемешанной смеси (массы); перемещение готовых изделий; складирование сырья и изготовленной продукции (полуфабриката или фабриката); хранение материалов на складах. Следует отметить, что на структурообразование влияют не только основные, но и вспомогательные переделы. При транспортировании, складировании, хранении или других вспомогательных операциях возможно значительное снижение качества ранее подготовленных материалов. Возможно, однако, и повышение его, если материалом не только охраняются приданные ему дополнительные потенции но они возрастают при реализации некоторых операций, например на стадии транспортирования, хранения.

В некоторых технологиях могут отсутствовать отдельные операции или по технологической схеме их продолжительность равна нулю. Ниже, во втором разделе — практической части науки — приведено немало конкретных технологий строительных материалов и изделий, в которых в разных вариантах сочетаются основные и вспомогательные переделы. В теории же трактуются главные принципы и закономерности, лежащие в основе практических переделов (операций) в технологии и необходимые для обеспечения наиболее эффективного структурообразования с приданием материалу оптимальной структуры. Оптимизация структуры при одновременном обеспечении уровня заданных свойств соответствует достижению высшего качества у материала или изделия. Технология по этому критерию становится прогрессивной.

2.2.1. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

К подготовительным работам относится комплекс операций, сопутствующих практически всем технологиям. Их основное назначение — придать сырью технологическое состояние, удобное и эффективное при прохождении сырья по последовательному циклу переделов с образованием готовой продукции. На этой стадии технологии важно полнее раскрыть и, по возможности, преувеличить потенциальную энергию сырья с тем, чтобы на последующих этапах (перемешивание, формование и т.п.) свободная внутренняя и поверхностная энергии перешли в другие ее формы, способствуя процессам новообразований и фаз, отличных от исходных сырьевых, а также структуры — внутреннего строения готового материала (изделия).

В целях уменьшения расхода внешних энергоресурсов, упрощения и удешевления подготовительных работ весьма целесообразен поиск сырья, которое заранее претерпело геологическую обработку, благоприятно отразившуюся на спонтанной или искусственной активизации его перед употреблением в технологии строительных материалов. В работе В.С. Лесовика [17] показано, что величина энергетической способности горных пород и породообразующих минералов существенно зависит от генезиса (рис. 2.1). Так, например, по составу, внутреннему строению и внешнему сложению попутно добываемые породы как отходы горнорудного производства КМА и кора выветривания кимберлитов алмазонасной провинции Севера РФ значительно отличаются повышенной активностью от традиционного, сходного по составу, сырья, используемого в строительной индустрии. Известно, что традиционные горные породы добывают в качестве сырья путем, как правило, открытой разработки сравнительно мелких карьеров, глубиной до 40—50 м. Между тем попутно добываемые породы, получаемые после обогащения¹ руд, извлекаются из более глубоких месторождений (450—500 м).



Рис. 2.1. Генетическая классификация горных пород как сырья для производства строительных материалов

На этой глубине геологические процессы способствовали естественной технологической активизации пород как потенциального сырья. Эта активизация выражается обычно в нарастании дефектности кристаллической решетки породообразующих минералов, частичной аморфизации породы и ее структурных зерен, которые претерпевают к тому же частичную или полную деструкцию с увеличением удельной и суммарной поверхности

твердых частиц. Обнаружено, что реакционная способность глинистых частиц при деструкции им соответствующих минералов значительно повышается вследствие возрастания неупорядоченности (энтропии) кристаллических решеток. Аналогичное явление характерно для тонкодисперсного кварца ; корродированной поверхностью. Между тем и то, и другое явления обусловлены соответствующим генезисом пород, а производственный эффект выражается сокращением в 2—3 раза продолжительности изотермической выдержки в автоклаве при получении силикатного материала. Возрастает и прочность такого материала по сравнению с применением обычного сырья.

В зависимости от разновидности сырья подготовительные операции заключаются в измельчении, помоле, распушке и других способах перевода сырья в тонкодисперсное состояние; фракционировании, просеве, промывке и других методах очищения поверхности частиц и разделения их на отдельные группы (фракции) по гранулометрическому (зерновому) составу; увлажнении или обезвоживании (сушке) сырья; нагревании, обжиге и охлаждении сырья перед употреблением в смесях; обогащении, т.е. повышении однородности сырья по массе, прочности и другим качественным показателям, что нередко совмещается с физико-химической обработкой с целью дополнительного повышения активности поверхности частиц или изменения ее полярности, поверхностного натяжения и т.п.

Измельчение и помол — наиболее распространенные подготовительные операции. Уменьшение размеров частиц грубозернистых сырьевых материалов вызывается необходимостью: обеспечить определенное соответствие между размерами частиц смеси и конструктивными элементами изделий; облегчить технологические операции на стадиях приготовления смеси; повысить плотность и однородность дробленого материала; увеличить удельную поверхность порошкообразного вещества после помола исходного материала. Известно, что между размером зерен y и удельной поверхностью x существует обратная пропорциональная зависимость: $x=a/y^n$, где a — величина поверхности частицы, размер которой равен 1. Эту зависимость можно изобразить в виде гиперболической кривой в системе координат $Y—X$ (рис. 2.2). С уменьшением размера каждой частицы общая поверхность измельченного вещества увеличивается, тогда как объем частицы при сложении обломков остается постоянным. Быстро увеличивающаяся с измельчением поверхность обладает особым запасом поверхностной энергии, которая в дальнейшем расходуется при смешении нескольких компонентов в общую смесь, при формировании изделий из смеси с протеканием реакций по поверхностям раздела.

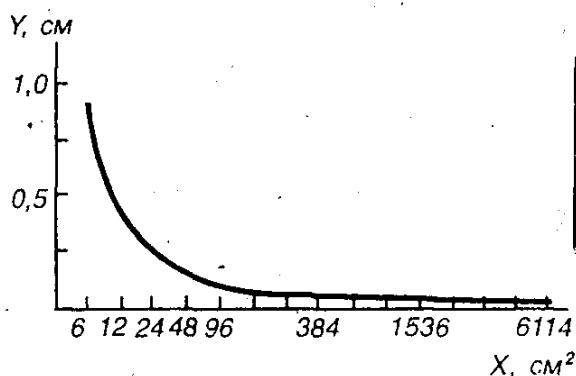


Рис.2.2. Зависимость удельной поверхности X от размера частиц Y измельченного сырья

После некоторого предела тонкости помола потенциальная энергия поверхности может возрасти в такой мере, что нередко происходит самопроизвольное (спонтанное) агрегирование (слипание) частиц с уменьшением удельной поверхности и увеличением комковатости и неоднородности исходного продукта. Рациональный предел тонкости помола устанавливают опытным путем. Он может быть повышен применением при

помоле добавочных так называемых поверхностно-активных веществ, способных создавать на поверхности пленки, экранировать частицы и предотвращать их агрегирование. Кроме того, при высокой дисперсности помола имеется опасность потери активности порошкообразного материала в период его хранения в связи с поглощением посторонних веществ (пыли, влаги, газов и др.) из окружающей среды. Приходится учитывать и то, что с увеличением степени измельчения значительно возрастают механическая работа и расход энергии на измельчение. По этой причине весьма полезно ориентироваться на породы разного генезиса (см. рис. 2.1).

Операцию измельчения нередко совмещают с разделением продукта помола по крупности частиц просеиванием или сепарацией. Эта операция называется *разделением сырья по фракциям*.

Другой операцией является *промывка* зернистых фракционных материалов — песка, дробленого камня (щебня), гравия — с целью уменьшения количества пыли и глины в смеси. Материалы промывают чистой водой или с добавлением химических веществ. Но имеются и сухие способы очищения зернистых сырьевых материалов, что предохраняет их от смерзания в зимний период работ, например колориметрические, рентгеносепарационные и др.

Нередко исходные сырьевые материалы подвергают так называемому *обогащению*, т.е. повышению однородности по прочности, плотности и т.п. В основе обогащения лежат физические законы. В зависимости от принятого способа они могут быть законами гравитации, сепарации, флотации, упругости и др. Эффективность способа оценивают по степени обогащения, количеству (выходу) обогащенного продукта и его качеству.

Весьма важная роль в подготовительный период отводится *тепловому воздействию* на сырьевой материал, чтобы его просушить, нагреть до необходимой температуры и даже подвергнуть кратковременному обжигу с целью, например, частичной или полной его дегидратации, аморфизации, укрупнения частиц для понижения пластичности (например, глины).

Процесс *сушки* назначают с учетом особенностей исходного сырья как многокомпонентной системы, состоящей из вещества, слагающего сырьевой материал, влаги, воздуха и паров воды. Если сырьевой материал подвергнуть воздействию теплового агента (нагретого воздуха, дымового газа и др.) или специальных источников нагрева (ламповые излучатели, ТЭН, паровые регистры и др.), то с поверхности влага испаряется, а внутри перемещается к поверхности испарения за счет капиллярных сил, градиентов влажности и температуры. Общее влагосодержание сырьевого материала уменьшается пропорционально продолжительности сушки, т.е. по линейному закону (рис. 2.3, отрезок б—в). Температура поверхности материала в этом интервале остается постоянной и равна температуре адиабатического насыщения воздуха. Температура в центральных слоях материала продолжает повышаться и достигает температуры адиабатического насыщения позже, в точке д. До точек б и г уменьшение влагосодержания идет не по прямому закону. Динамика сушильного процесса показана на рис. 2.4. После высушивания материал нагревают до необходимой температуры. Нередко обе операции совмещают в одном тепловом агрегате, например в сушильном барабане или на колосниковой решетке.

Нагревание материала, выпаривание из него влаги или растворителя, оказавшегося в нем, а также последующее охлаждение и другие тепловые процессы протекают в соответствии с законами теплоотдачи. Основное уравнение теплопередачи устанавливает зависимость между тепловым потоком Q и поверхностью F теплообмена: $Q = kF\Delta t_{cp}\tau$, где k — коэффициент теплопередачи, определяющий среднюю скорость передачи теплоты по поверхности теплообмена; Δt_{cp} — средняя разность температур между теплоносителями, определяющая среднюю движущую силу процесса теплопередачи, или температурный напор, °С; τ — продолжительность процесса теплопередачи. Из уравнения видно, что количество теплоты, передаваемое от более нагретого теплоносителя к более холодному,

пропорционально поверхности теплообмена F , среднему температурному напору $\Delta t_{ср.}$ и времени передачи.

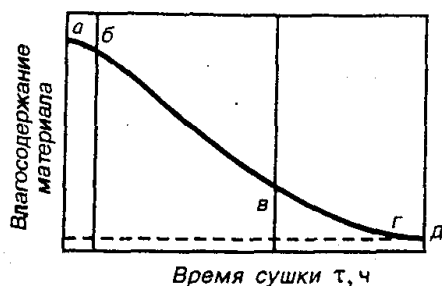


Рис. 2.3. Изменение влагосодержания материала в процессе сушки

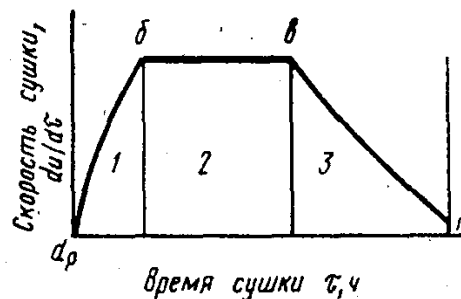


Рис. 2.4. График скорости сушки: 1 — период нарастающего прогрева материала (d_p —б); 2 — период постоянной скорости сушки (б—в); 3 — период падающей скорости сушки (в—г)

Передача теплоты на расстояние осуществляется тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением. В основе этих способов теплопередачи находятся соответственно законы Фурье, Ньютона и Стефана—Больцмана. В реальных условиях теплота чаще всего передается комбинированным способом, однако преобладающим в нем остается все же один из указанных выше способов.

При необходимости нагревание материала (сырья) может быть доведено до обжига в печных агрегатах по заранее рассчитанному режиму соответственно температурной кривой. Однако обжиг в подготовительный период требуется иногда лишь для снижения излишней пластичности сырья, например глин, при отсутствии поблизости песчаных карьеров.

На стадии подготовительных работ производят нередко также *физико-химическую* или *химическую обработку* сырьевых материалов. Она повышает активность подготавливаемых компонентов смеси, облегчает и ускоряет основную технологическую операцию, благоприятствует получению ИСК более плотного и прочного, лучшего по другим качественным характеристикам. Такая обработка заключается, обычно, в добавлении в смесь специальных веществ, имеющих различные или комплексные функции, — уплотняющие, минерализующие, порообразующие, гидрофобизирующие, коагулирующие (электролиты) и т.п. Она может быть совмещена с механической обработкой, например, путем помола сырья в смеси с добавкой. Тогда свежееобразующая поверхность измельчаемых частиц поглощает добавочное вещество (добавку) с образованием на поверхности молекулярных (пленок) или новых химических соединений, повышая активность порошкообразного материала.

Некоторые сырьевые компоненты находятся в жидком состоянии и вступают во взаимодействие с твердыми компонентами смеси. Поэтому, чтобы усилить их индивидуальные особенности, подобно твердым их подвергают нагреванию, рафинированию, электромагнитному воздействию, обогащению с введением добавочных веществ, например поверхностно-активных ингибиторов, электролитов и др.

Подготовленные сырьевые материалы *транспортируют* к местам временного накопления для последующих операций (дозирование, перемешивание). При прогрессивной технологии транспортирование является не только перемещением (вертикальным, горизонтальным или наклонным), но используется так же как дополнительный фактор, положительно влияющий на структурообразовательный процесс. В этих целях предусматриваются не только конструктивно-технологические мероприятия по защите в пути от охлаждения — нагретого, от увлажнения — просушенного, от загрязнения — промытого, от перемешивания — фракционированного, материалов, но и дальнейшая

активизация их с помощью соответствующих агентов (тепловых, адсорбирующихся из воздушной среды, вибрационно-пульсирующих и др.).

В емкостях (бункерах, силосах и др.) *временного накопления и хранения* подготовленных сыпучих материалов возможны заторы при их перемещении с образованием устойчивых сводов. Самопроизвольное прекращение истечения этих материалов приводит к нарушению общего ритма работы завода, дефектности дозирования, снижению однородности и качества смеси. Для борьбы с образованием сводов в толще сыпучего материала используют специальные устройства (сводообрушители). Они, однако, не всегда бывают эффективными, особенно при хранении мелкофракционных смесей. В настоящее время установлены аналитические зависимости, которые связывают характеристики мелкофракционного сыпучего материала и емкости с основными параметрами процесса истечения, что позволяет рассчитывать геометрию бункера с заданными формой выпускного отверстия и скоростью истечения. Возможность образования свода сыпучего материала учитывают на стадии проектирования системы «бункер—дозатор» [25].

На качество смеси изготавливаемого строительного материала может сильно влиять точность *дозирования*. Если под влиянием внешних или внутренних причин нарушается точность дозирования (автоматического отвешивания или объемного отмеривания) или ритмичность перемещения отдозированных компонентов к смесительному аппарату, то в процессе перемешивания возможно снижение качества получаемой смеси (массы) и готового материала (изделия).

2.2.2. ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ОТДОЗИРОВАННЫХ КОМПОНЕНТОВ СМЕСИ

Для большинства технологий перемешивание отдозированных материалов является главной операцией, предопределяющей качество смеси (массы) и готовой отформованной продукции. В смесительных аппаратах, особенно при производстве безрбжиговых конгломератов, возникают, развиваются, а иногда и почти полностью завершаются основные процессы структурообразования вяжущей части, в частности, микрослоев. Но возможно, что перемешивание — всего лишь обычная разновидность подготовительной работы, например при изготовлении шихты с последующим нагреванием ее до расплава при производстве обжиговых изделий.

Наибольшее распространение получил способ перемешивания с введением в смесь механической энергии от внешнего источника, а среди типов смесителей — роторные принудительного действия. Механическое перемешивание осуществляется в две стадии: 1) предварительное смешение сухих компонентов; 2) смешение с жидкостью, принятой как обязательный компонент изготавливаемой смеси (массы) безобжиговых ИСК или как возникающих из легкоплавких веществ при изготовлении обжиговых ИСК.

Нередко перемешивание отдозированных компонентов и добавок к ним производится и без предварительного получения сухой смеси, т.е. в один этап. При перемешивании сухих материалов (холодных, подогретых или горячих) происходит самопроизвольное выравнивание температур с переходом теплоты от тел, обладающих более высокой температурой, к телам с более низкой температурой до полного выравнивания их температур и до максимального значения суммарной энтропии взаимодействующих тел. При этом происходит разрушение начальных связей между частицами с обеспечением их подвижности, равномерное распределение частиц в общей смеси с заполнением межзерновых пор более мелкими фракциями заполняющего материала. Порошкообразные материалы заполняют тонкие поры зернистой части смеси, а некоторая доля наиболее тонкодисперсных частиц порошка механически задерживается или осаждается и фиксируется на поверхности зерен крупного материала.

При введении в смесь жидкого компонента дальнейший процесс механического перемешивания основывается на закономерности обтекания твердых частиц дисперсной фазы потоком дисперсионной среды (жидкости). В зависимости от скорости движения частиц фазы в среде возникают ламинарные потоки или турбулентные завихрения. В последнем случае происходит отрыв пограничных слоев среды от поверхности твердых частиц. При ламинарном режиме (критерий Рейнольдса $Re > 30$) перемешиваются в основном только те слои, которые непосредственно примыкают к лопастям и участвуют во вращении вместе с ними. При турбулентном режиме (критерий Рейнольдса $Re > 10^2$) происходит более интенсивное перемешивание слоев жидкости с отрывом их от лопастей мешалки. При высокоразвитой турбулентности (критерий Рейнольдса $Re > 10^5$) часто затраты на дополнительную мощность для увеличения частоты вращения вала мешалки не соответствуют получаемому эффекту перемешивания, например по величине коэффициентов тепло- и массоотдачи.

Более точные и рациональные пределы критериев Рейнольдса обусловлены конструкциями смесительных аппаратов, их геометрическими размерами, но предел эффективности турбулентного режима практически имеется во всех аппаратах. В частности, при турбулентности $Re > 10^5$ можно достичь большего эффекта перемешивания и активизации при использовании в качестве энергоносителей газа, воздуха, пара или паровоздушной смеси, электрического поля, гравитационного фактора и др. С этой целью используют смесители роторные непрерывного действия, струйные с электронно-ионным устройством или без него и др. В некоторых смесителях обеспечивается не только быстрое получение однородной смеси, но и ее нагревание, что при необходимости позволяет воспользоваться горячим формованием изделий без специальной термообработки на последующих технологических стадиях.

При перемешивании в один этап жидкую среду подают в смесительный аппарат одновременно с твердыми компонентами смеси. Поверхность твердых частиц смачивается, а температура смеси выравнивается по всему объему, так как компоненты были приняты с неодинаковой температурой, кроме того, и процесс смачивания - экзотермический. Количество выделяемой теплоты смачивания может быть измерено микрокалориметрами или другими аналогичными приборами в лабораторных условиях. Оно характеризует степень интенсивности взаимодействия компонентов. Если, например, в поверхностном слое превалируют отрицательные гидроксильные ионы, то смачиваемость водой полная, количество выделяемой теплоты большое, а поверхность частиц относится к *гидрофильной*.

Если превалируют положительные ионы тяжелых¹ металлов, то высокая смачиваемость обеспечивается при контакте с маслом, и тогда поверхность твердых частиц относится к *олеофильной*. При полном смачивании в других жидкостях частицы характеризуются как *лиофильные*, причем независимо от разновидности жидкой среды полное смачивание указывает на способность твердых частиц к растворимости в ней с образованием истинных (молекулярных) растворов, как гомогенных (однородных) систем. Следовательно, лиофильность связана с малым межфазным натяжением, устойчивостью поверхностей к взаимному слипанию и растворимости.

Более характерным процессом при перемешивании компонентов является формирование *гетерогенной* системы, которая отличается от *гомогенной* (однородной) наличием двух или большего количества фаз², контактирующих между собой по поверхностям раздела. Многие твердые вещества, как компоненты общей смеси, обладают поверхностью с различным сочетанием на ней положительных и отрицательных ионов. Поэтому они смачиваются как водой, так и маслом, хотя их смачиваемость хуже, чем гидрофильных или олео-фильных.

Характер поверхности твердых тел можно существенно изменить добавлением поверхностно-активных веществ, когда, например, гидрофильная поверхность может стать гидрофобной (процесс гидрофобизации) или гидрофобная поверхность — гидрофильной (процесс гидрофилизации). Вводимые в жидкую среду поверхностно-активные вещества широко используют для повышения смачиваемости поверхности твердых тел, что основано на снижении разности полярностей между поверхностью частиц твердого тела и жидкостью. В смесительном аппарате возникает своеобразный процесс выравнивания составов, поверхностного и внутреннего слоев. Скорость этого выравнивания зависит от интенсивности перемешивания, конструкции смесителя и других факторов. Когда механическое перемешивание не применяется или оно было отключено преждевременно, то процесс выравнивания происходит сравнительно медленно за счет диффузии, разности в плотности веществ или под влиянием тепловых конвекционных токов.

Важнейшим законом гетерогенного равновесия, открытого Гиббсом, является правило фаз: $\Phi = (K - C) + 2$, где Φ — количество фаз системы; C — число степеней свободы, т.е. наибольшее число условий (температура, давление, концентрация вещества), которые можно изменять, не нарушая равновесия системы; оно всегда больше или равно нулю, поэтому $\Phi = K + 2$, где K — количество компонентов или химически индивидуальных частей системы.

С увеличением интенсивности принудительного перемешивания уменьшается толщина диффузионного слоя, в пределах которого протекают процессы самопроизвольного выравнивания концентраций, ускоряется образование гетерогенной системы в целом. Эта скорость возрастает при непрерывном обновлении поверхности контакта и при

¹ Металлы по плотности условно разделяют на легкие (плотность их меньше 5) и тяжелые (с истинной плотностью больше 5).

² Фазой называется часть системы, отграниченная от других поверхностью раздела; она имеет одинаковые состав и свойства, т.е. относится к однородной (гомогенной) системе.

возрастании поверхности твердой -или жидкой фазы, например, при перемешивании по принципу противотока, к тому же нередко совмещаемого с дополнительной диспергацией твердого компонента (например, при перемешивании на бегунах, в дезинтеграторах и некоторых других аппаратах) или «кипящем слое» (принцип псевдокипения).

Гетерогенный процесс часто сопровождается возникновением и накоплением в смеси новой фазы в результате выделения растворенного вещества из пересыщенного раствора (зародышевые кристаллики), протекания химических, в частности, топохимических, реакций с образованием соответствующих соединений (новообразований), формирования пузырьков газа или пара и др. Наибольшее количество новообразований возникает под влиянием вводимых в смесь катализаторов. Для замедления реакций пользуются не положительными катализаторами, ускоряющими реакцию, а отрицательными (ингибиторами). Среди гетерогенных процессов немалое значение в структурообразовании конгломератов имеют физическое (сорбционное) поглощение (адсорбция и абсорбция) и химическая — хемосорбция. Из окружающей среды сорбируются (поглощаются) те вещества, которые способны уменьшить поверхностную энергию, что соответствует так называемой адсорбции. Возможен и обратный процесс — увеличение энергии, например величины поверхностного натяжения, за счет частичной десорбции, что означает отрицательную адсорбцию. Повышение температуры и понижение давления, а также снижение концентрации адсорбируемого вещества (адсорбата) способствуют десорбции ингредиента, ранее физически поглощенного адсорбентом.

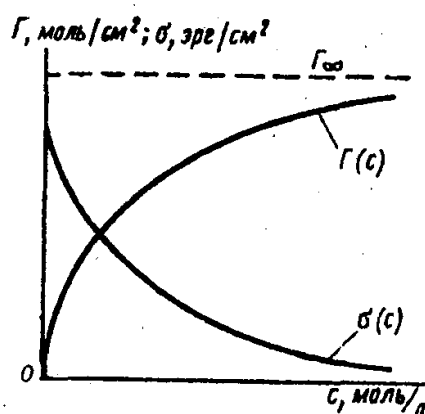


Рис. 2.5. Изотерма адсорбции $\Gamma(c)$ и поверхностного натяжения $\sigma(c)$ при температуре $T=\text{const}$

Структурообразование с участием поверхностно-активных веществ (ПАВ) происходит с предварительным образованием на поверхности моно- и полимолекулярных слоев. Эти слои обладают повышенной плотностью, а их свойства резко отличаются (иногда становятся прямо противоположными) от свойств вещества внутренней части тела. На поверхности адсорбента возникает поле сорбционных сил — электростатических и электрокинетических, активно участвующих в структурообразовании. Прочность фиксации адсорбционного слоя обусловлена величиной поверхностной энергии, природой адсорбента, но не величиной его поверхности. Последняя же предопределяет количество вещества, адсорбируемого из раствора. Но поверхность может не полностью покрываться адсорбционным слоем. Степень насыщения ее адсорбатом при данной температуре T зависит от концентрации адсорбируемого вещества в окружающей среде. С повышением концентрации C (рис. 2.5) увеличивается количество Γ адсорбируемого вещества. Зависимость $\Gamma=f(c)$ называется изотермой адсорбции и выражается аналитической формулой Лангмюра

$$\Gamma = \Gamma_{\infty} \frac{c}{c + \alpha}, \quad (2.1)$$

где Γ_{∞} — количество адсорбированного вещества при предельном насыщении; $1/\alpha$ — постоянная величина, характеризующая адсорбционную активность адсорбента; имеет ту же размерность, что и $1/C$. Она пропорциональна начальной поверхностной активности g_0 при $C=0$. Чем больше эта величина, тем выше адсорбционная активность, круче подъем изотермы адсорбции при данной температуре. Величина $g_0 = -d\sigma/dC$, т.е. вещество понижает поверхностное натяжение. Тогда адсорбция положительна ($\Gamma > 0$) и такие вещества называются поверхностно-активными. К ним относятся многие органические вещества, растворенные в воде. В противоположном случае адсорбция отрицательна: $\Gamma < 0$, а вещество в растворе является поверхностно-инактивным, оно повышает поверхностное натяжение.

Адсорбционные слои различных веществ способствуют устойчивости (стабилизации) системы тем больше, чем ближе адсорбция находится к своему предельному насыщению (Γ_{∞}).

Эмпирическое уравнение адсорбции из растворов было получено Фрейндлихом: $a = k\sqrt[n]{C}$, где a — количество адсорбированного вещества; C — концентрация растворенного вещества в растворе; k и n — эмпирические параметры, постоянные для данных адсорбента и растворенного вещества при данной температуре. В случае адсорбции газа вместо концентрации C в формулу вносится давление газа P , а постоянная k — максимальное количество газа, которое способно адсорбироваться данным количеством адсорбента.

С увеличением молекулярной массы адсорбента возрастает его способность к физической адсорбции. Из растворов лучше адсорбируются вещества с меньшей растворимостью в данной среде. Как правило, величину адсорбции выражают в микромолях на квадратный метр, а у пористых тел — в микромолях на единицу массы (килограмм). Процессу адсорбции благоприятствует понижение температуры. Однако адсорбция может быть значительной при высокой температуре и усиливается с дальнейшим ее повышением. В этом случае адсорбция называется *активированной*; она связана с протеканием химических реакций (хемосорбцией), возрастанием концентрации реагирующих молекул. Адсорбция из сложных молекулярных растворов находится в зависимости от скорости диффузии или от времени поступления к поверхности адсорбента свободных молекул поверхностно-активного вещества под влиянием диффузии. Но скорость диффузии тем меньше, чем больше размеры диффундирующих частиц, поэтому вначале может произойти отеснение с поверхности адсорбента молекул растворителя менее активным веществом и только на поздней стадии внутренних процессов в системе произойдет вторичное отеснение слабо ориентированных молекул более сильным поверхностно-активным веществом.

Молекулярная диффузия описывается первым законом Фика: количество вещества dM , продиффундировавшего за время dt через поверхность F (нормальную, к направлению диффузии), пропорционально градиенту концентрации dC/dh этого вещества:

$$dM = D \cdot F d\tau \frac{dC}{dh} \text{ или } M = D \cdot F \tau \frac{dC}{dh}, (2.2)$$

где D — коэффициент диффузии, показывающий количество вещества, диффундируемого в единицу времени (1с) через единицу поверхности (1 см²) при градиенте концентрации, равном 1.

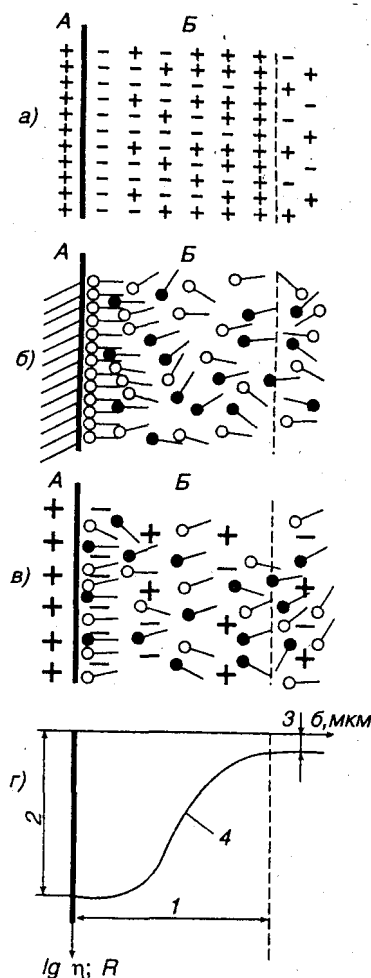


Рис. 2.6. Диффузный слой в пограничной зоне А—Б:

а — двойной электрический слой; б — адсорбционно-сольватный слой; в — ионно-адсорбционный слой; г — изменение механической прочности (вязкости, предельного напряжения сдвига и др.) в диффузионном слое; 1 — условная толщина диффузионного слоя; 2 — логарифм вязкости (прочности) объемной (свободной) среды; 3 — логарифм вязкости, прочности и т.д. в пристенном (плотном) слое; 4 — кривая изменения вязкости в пределах диффузионного слоя среды

Скорость диффузии возрастает с повышением температуры (примерно на 1—3 % на 1° С), особенно, если при этом еще понижается вязкость среды η и уменьшается размер r частиц, так как установлено, что $D = RT/N_A \cdot 1/6\pi\eta r$, где N_A — универсальная постоянная (число Авогадро), равная $6,02 \cdot 10^{23}$.

Наряду с поглощением нейтральных молекул и, следовательно, обратимой молекулярной адсорбцией может происходить ионная адсорбция, которая сопровождается обычно явлением обмена ионами между адсорбентом и растворенным веществом. По существу возникает химическая (обменная) реакция с образованием в поверхностном слое нового соединения, а поверхность частиц твердого тела покрывается слоем продукта реакции. На поверхности твердого тела почти всегда один из ионов адсорбируется преимущественно, т.е. избирательно.

Избирательно адсорбируются ионы, которые имеют общую атомную группировку с данной поверхностью твердого вещества, но противоположный знак заряда. Образующееся в результате такой хемосорбции на поверхности новое соединение имеет пониженную растворимость или полную нерастворимость в контактируемой среде. Это означает, что полная адсорбция в большинстве случаев необратима, разбавление раствора не вызывает десорбции. Вместе с тем она придает поверхности иные природу и свойства, тогда как состав и свойства внутренних слоев твердой фазы не изменяются.

Образование адсорбционных слоев вокруг частиц дисперсной фазы имеет непосредственное отношение к устойчивости гетерогенной, а точнее — микрогетерогенной системы. Адсорбционные слои (пленки) не только понижают (как отмечалось выше) поверхностное натяжение на границах раздела фаз, но и обладают значительной прочностью на разрыв. Иногда называемые соль-ватными оболочками они имеют повышенную упругость, что способствует предохранению дисперсных частиц от взаимослипания или сцепления.

В повышении агрегативной устойчивости дисперсной системы значимы также электрические заряды, перераспределяемые на поверхности раздела фаз с образованием двойного электрического слоя. Между фазами устанавливается определенная разность потенциалов, которая может изменяться под влиянием избирательной адсорбции ионов из раствора. В пределах толщины двойного слоя происходит постепенное убывание концентрации избыточных ионов по направлению от плотного слоя у поверхности твердого тела (частиц дисперсной фазы) до равновесной концентрации в свободной части среды. Такое убывание плотности или концентрации электрического потенциала, а также аналогичное убывание адсорбционных сил при молекулярной адсорбции поверхностно-активного вещества характеризует диффузное строение. В пределах диффузного слоя многие свойства (например, прочностные, вязкость и др.) могут изменяться в значительных размерах (рис. 2.6). В смесительном аппарате при перемешивании смеси возможны и реже встречающиеся процессы и явления. Так, может возникнуть самопроизвольное уплотнение гелеобразной части вяжущего вещества с поглощением синере-зируемой¹ среды пористым и лиофильным наполнителем. Возможны явления кантаминации, заключающиеся в загрязнении смеси случайно или преднамеренно оставленными инородными примесями в исходных подготовленных материалах-компонентах, например присутствие глинистых, органических или иных примесей в строительном песке при изготовлении бетона. Возможны также явления тиксотропии (восстановления разрушенной структуры), если в ходе перемешивания возникает вынужденная остановка смесительного аппарата с последующим возобновлением прерванного перемешивания. Эти и другие подобные малопредвиденные явления влияют на структурообразование и особенно формирование структуры микрослоев вокруг частиц и зерен заполняющего материала, структуры вяжущего вещества, распределяющегося в межзерновых порах и пустотах.

Под влиянием сложного комплекса физико-химических процессов и химических реакций, протекающих при перемешивании в смесительных аппаратах, подготовленные и отдозированные сырьевые материалы — компоненты теряют (обратимо или необратимо) свои индивидуальные свойства, особенно в поверхностных слоях, т. е. по границам контактирования компонентов и новообразований. К моменту выхода из смесительного аппарата процессы микроструктуро-образования в одних системах в основном завершаются, в других — эти процессы в смесителях только начинаются, но не доходят до лавинного развития, а поэтому с большей или меньшей интенсивностью продолжают на последующих стадиях технологического цикла. Об эффективности перемешивания нередко судят по качественным изменениям главных (ключевых) исходных компонентов, или по количественному выходу продуктов новообразований, по прочности ИСК, сформованного из смеси. Впрочем, увеличение прочности нередко связано с эффектом механо-химической активации под влиянием дополнительного измельчения частиц при их взаимном столкновении или ударах о лопасти и стенки смесительного аппарата.

Критерием оценки качества смеси служит ее однородность, определяемая статистическими методами — по дисперсии, среднеквадратичному отклонению, различным коэффициентам. Обычно вычисления проводят по меньшему компоненту,

¹ Синерезис - самопроизвольное сжатие, сопровождаемое отделением жидкой среды (экссудата).

называемому ключевым. Так, по А.М. Ластовцеву, коэффициент неоднородности определяют по формуле

$$k_c = \frac{100}{C_0} \sqrt{\frac{\sum (C_i - C_0)^2 n_i}{N - 1}}, \quad (2.3)$$

где C_i — значение концентрации ключевого компонента в пробах; C_0 — значение концентрации ключевого компонента при идеальном перемешивании; n_i — количество проб с концентрацией C_i ; N — общее количество проб; i — количество групп проб.

Нередко процесс перемешивания описывают критериальным уравнением:

$\tau \cdot n = C' \text{Re}_{\text{Ц}}^A \text{Fr}_{\text{Ц}}^B$, где $\text{Re}_{\text{Ц}}^A$, $\text{Fr}_{\text{Ц}}^B$ — центробежные критерии Рейнольдса и Фруда; τ — время перемешивания, мин; n — угловая скорость вращения рабочего органа мешалки, об/мин; C' — коэффициент пропорциональности; A , B — показатели степенной функции. В области развитого турбулентного движения смеси в аппарате это уравнение переходит в более удобное: $\tau n = \text{const}$.

Приготовленная смесь (масса) обладает определенными качественными характеристиками, оцениваемыми по показателям свойств. Последние выражают способность вещества реагировать на внешние и внутренние факторы (механические, тепловые, гравитационные и др.). Главным свойством приготовленной смеси (массы) является ее способность к технологической обработке — распределению слоя заданной толщины, уплотнению, формованию с уплотнением. Такую способность смеси называют удобообрабатываемостью, удобоформуемостью, подвижностью и относят к группе структурно-механических или реологических¹ свойств. У грубозернистых смесей они измеряются с помощью условных методов и приборов, а у тонкодисперсных — инвариантными с испытанием на чистый однородный сдвиг (в вискозиметрах и подобных им приборах). Если смесь обладает истинной (ньютоновской) вязкостью, то ее течение соответствует уравнению $P = \eta(\Delta u / \Delta x)$, где P — напряжение; Δu — разность скоростей течения в двух параллельных слоях; Δx — расстояние между слоями; $\Delta u / \Delta x$ — градиент скорости течения, с^{-1} ; η — динамическая вязкость (Па·с), являющаяся в уравнении коэффициентом пропорциональности. Видно, что в ньютоновском (вязком) течении уже при самых малых напряжениях возникает деформация со скоростью, прямо пропорциональной величине напряжения или приложенной к телу силе. Однако смеси с ньютоновской вязкостью в практике строительных материалов встречаются редко.

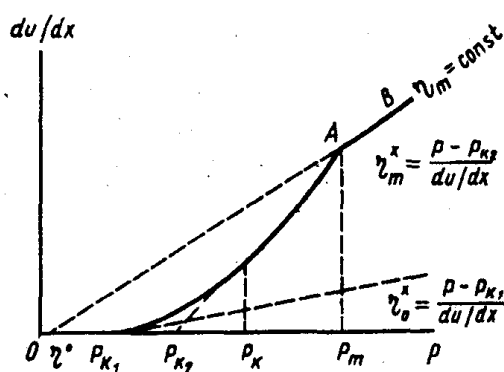


Рис. 2.7. Реологическая кривая, или кривая течения в системе координат «напряжение (P) сдвига – градиент скорости (du/dx) деформации»

Более часто готовят и используют смеси, не обладающие истинной вязкостью и деформируемостью со скоростью, пропорциональной напряжению (или приложенному усилию). Они пластичны, менее подвижны и являются структурированными. Течение

¹ Реология — наука о течении, развивающемся в материале во времени.

структурированной смеси начинается только тогда, когда под действием некоторого напряжения P_{κ} , называемого пределом текучести, структура постепенно начинает разрушаться. Такое пластическое течение удовлетворяет уравнению $P = P_{\kappa} + \eta_{пл}(\Delta u / \Delta x)$, где $\eta_{пл}$ — бингамовская (по имени Бингами, изучавшего ее) вязкость смеси. При возрастании напряжения P (или градиента скорости) процесс разрушения структуры нарастает (рис. 2.7), а при достижении напряжения P_m структура полностью разрушается. Вместе с тем прекращается и непрерывное снижение бингамовской вязкости. При дальнейшем увеличении напряжения вязкость η практически остается постоянной, а структура — полностью разрушенной. Однако характер движения может измениться с ламинарного (участок A — B) на турбулентное (участок выше B). На кривой течения (реологической кривой) вязкость снижается от напряжения, равного $P_{\kappa l}$ как условного статического предела текучести до точки A , соответствующей началу полностью разрушенной структуры с наименьшей вязкостью η_m . На этой кривой отмечаются еще точка $P_{\kappa 2}$ — динамический предел текучести и ранее отмечавшаяся точка P_{κ} — предел текучести, или предельное напряжение сдвига. Значение этих реологических характеристик состоит в том, что возможно предусмотреть допустимые напряжения без нарушения сплошности изделий при формовании их из смеси (массы).

2.2.3. ФОРМОВАНИЕ И УПЛОТНЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СМЕСИ

Свежеприготовленная смесь (масса) обладает определенной удобообрабатываемостью, что выражается в ее реальной способности воспринимать технологические операции по формированию и уплотнению изделий.

Смеси с весьма малой вязкостью (называемые литыми) практически не требуют уплотнения при формировании изделий или покрытий, что составляет значительное технологическое удобство. Для воспроизведения литьевой технологии в смесь вводят нередко соответствующие пластификаторы или даже суперпластификаторы. Введенные даже в малых количествах они способствуют резкому понижению вязкости смеси, облегчая формирование изделий и в том случае, когда их очертания отличаются повышенной сложностью. Той же цели достигают дополнительным увеличением количества жидкостной среды в смеси (массе), что должно быть каждый раз обосновано с общих позиций оптимизации структуры и требований к конкретным видам оптимальных структур.

При использовании смесей с повышенной вязкостью, обладающих на реологической кривой условным динамическим пределом текучести и предельным напряжением сдвига, важно не допустить при формировании напряжений, способных разрушить сплошность изделия. Так, например, в некоторых случаях отмечается образование дефектов структуры (свилей), если допустить напряжение в массе, превышающее P_{K2} (см. рис. 2.7). Опыт показывает, что для хорошо формирующихся смесей величина отношения P_{K1}/η должна быть не ниже $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Конкретные и точные пределы реологических характеристик зависят от разновидности смеси и технологического способа формирования — пластичного, вибрационного без пригруза или с пригрузом и т. п.

Формование изделий сопряжено, как правило, с плотной укладкой смеси, зернистых или другого вида заполнителей. Наибольшее значение плотности стремятся получить еще на стадии подготовки сырья — порошков, суспензий, грубозернистых смесей и других формовочных систем, особенно при производстве обжиговых ИСК. Предварительное уплотнение смеси уменьшает разобщенность частиц, переводя связи из точечных в межфазные по границам контакта. На последующих стадиях технологии (например, при обжиге) сокращается расход тепловой энергии за счет снижения температуры и уменьшения продолжительности выдержки.

В зависимости от разновидности смеси (массы) формование производится с использованием укладчиков, прессов (например, ленточных), экструдеров, каландров и других машин. Выбор оптимального способа формования и уплотнения зависит от характера исходного сырья и массовости производства, требуемых свойств и вида изделий. Но при всех способах важно обеспечить связность и начальную прочность изделий с последующим упрочнением их на других стадиях обработки. Начальная связность возникает под влиянием молекулярных (ван-дер-ваальсовых) сил. Они имеют электрическую природу и способны развивать притяжение частиц при их сближении. Силу взаимодействия двух частиц (условно принимая их сферическими) рассчитывают по формуле

$$P = 4\pi \frac{r_1 - r_2}{r_1 + r_2} \sigma, \quad (2.4)$$

где r_1 и r_2 — соответственно радиусы двух соседствующих частиц; σ — поверхностная энергия на границе раздела фаз.

С приближением частиц на очень малые расстояния возникают и возрастают силы отталкивания. В конечном итоге действует результирующая сила, которая при некотором оптимальном расстоянии частиц друг от друга обеспечивает начальную связность сырьца изделия.

Уплотнение формуемых или отформованных изделий является важным этапом образования макроструктуры, поскольку в этот период в среде вяжущего вещества сравнительно устойчиво фиксируются зернистые и другие компоненты заполняющей части конгломерата. Фиксация может происходить как непосредственным примыканием компонентов, в том числе с возможным срастанием (например, кристаллов), так и через прослойки полностью отвердевшего или постепенно отвердевающего вяжущего вещества. Контакт через прослойки на стадии уплотнения более типичен в конгломератных материалах, чем непосредственное контактирование или срастание частиц под влиянием поверхностной энергии, химических связей или других, в том числе комплексных, факторов.

Вследствие сближения частиц смеси (массы) происходит перераспределение и выравнивание молекулярного силового поля, тепло- и массообмен, в частности, миграция среды в зоны меньших напряжений. Объем смеси (массы) как при уплотнении, так и после него уменьшается, а полидисперсная система постепенно переходит в состояние относительно устойчивого равновесия при заданном условии формования изделий. В зависимости от удобообрабатываемости готовой смеси (массы) возможны и некоторые специфические особенности формования макроструктуры ИСК. Так, при высокопластичных и подвижных смесях (массах) макроструктура устанавливается весьма быстро и практически без приложения уплотняющих усилий, но под влиянием гравитации или текучести (при наливных или литьевых способах производства). При уплотнении малоподвижных и жестких смесей, содержащих, как правило, пониженное количество вяжущего вещества или уменьшенное количество жидкой среды в нем, затрачивается значительно большая работа, чем при уплотнении пластичных, подвижных или литых смесей (масс). Разными приемами приходится принудительно сближать полидисперсные зерна, вытесняя часть вяжущего вещества в межзерновые поры и пустоты или в поры и пазы зерен заполнителя. Большая часть заполнителя в объеме монолита контактирует через тонкие или тончайшие прослойки вяжущего вещества. При недостаточном количестве вяжущего вещества прослойки становятся дискретными, что увеличивает пористость и содержание воздуха (или другой газовой фазы) в ИСК.

В обжиговых конгломератах распространенными являются способы полусухого гидростатического прессования; виброформования, а также горячего прессования.

Для достижения необходимой плотности применяют различные способы снижения реологического сопротивления формуемой смеси: введение поверхностно-активных веществ, пластификаторов и суперпластификаторов; предварительный нагрев; вибрационное воздействие; вакуумирование и др. При особо интенсивном уплотнении целесообразно повысить реологическое сопротивление до максимума. При оптимальной технологии каждой консистенции смеси (массы) соответствуют определенные параметры механического уплотнения. Каждому способу и каждой интенсивности механического уплотнения также соответствует своя определенная консистенция, и тогда размещение частиц твердой фазы в результате уплотнения смеси становится компактным.

Во многих технологиях формование и уплотнение смеси совмещаются в одну операцию, в результате чего химические и физико-химические процессы, обеспечивающие структурообразование на микро- и макроуровнях, протекают также одновременно. К ним относятся тиксотропное разжижение и упрочнение, массо- и теплообмен, перемещение заполняющей и вяжущей частей относительно друг друга с образованием плотной структуры к концу выполнения такой совмещенной операции. Естественно, что в этот период не прекращаются (хотя и замедляются) главные структурообразующие процессы — сорбционные, растворения и другие, которые подобно тому, как это было на стадии перемешивания смеси, завершаются возникновением новых соединений и фаз, хотя и в сравнительно ограниченных количествах. Гораздо в больших размерах они выделяются на последующих стадиях технологии, например при тепловой обработке отформованных и уплотненных изделий.

В некоторых технологиях используется прерывистое, ступенчатое уплотнение, например с интервалом времени между двумя вибрациями или прессованиями. Повторное уплотнение способствует как бы вторичному — пластическому деформированию конгломерата с отжатию среды из его микро- и макропор, а в конечном итоге — дополнительному уплотнению в условиях, когда количество вяжущего вещества продолжает оставаться в пределах допустимых отклонений от рекомендуемого. Повторное уплотнение, особенно при вибрационных способах формования, способствует релаксации напряжений, возникающих при структурообразовании, уменьшает размеры и концентрацию структурных дефектов.

От формования и уплотнения в определенной мере зависят не только характер структурообразования при сохранении одинаковой компактности укладки частиц, но и текстурные особенности изделия. Например, возможна переориентация частиц, в результате которой широкое сечение частиц и пор нередко располагается в плоскостях, параллельных плоскости прессования, с появлением анизотропии. Возможно также частичное доизмельчение зерен продолговатой формы или изменение (уменьшение) объема.

При полусухом прессовании объем получаемого изделия может оказаться в 1,5—2 раза меньше объема свободно насыпанной смеси (массы). Естественно, что тогда сокращается и пористость. Так, из формулы А.С. Бережного $\Pi = a - b \cdot \lg p$ (где Π — общая пористость, %; a , b — постоянные коэффициенты, причем постоянная a как пористость исходной массы перед прессованием составляет 50%, а b отражает способность массы к уплотнению; p — давление прессования, МПа) следует, что при $p \approx 100$ МПа, во многих случаях $b = 15$ и $\Pi \approx 20\%$, т. е. пористость сократилась в 2,5 раза (50:20). Распределение давления по вертикали снижается от штампа, что приводит к неоднородности в пористости отформованного сырого изделия (сырца). Неоднородность зависит не только от высоты изделия, но и от гидравлического радиуса $R = 2F/I$, где F — площадь; I — периметр изделия. Неравномерность пористости фиксируется и в горизонтальных сечениях: наибольшая плотность образуется в верхних горизонтальных сечениях сырца у стенок пресс-формы, уменьшаясь к центру. В нижних сечениях наблюдается обратное явление, а в средних по высоте сечениях — зона равнопористости. Тип пресса тоже имеет значение, но плотность сырца всегда зависит от величины давления, технологических свойств массы и времени действия давления пресса; иногда важно обусловить также и скорость нарастания максимального давления при уплотнении.

Кроме обычных прессов (механических, гидравлических) в некоторых технологиях используют прессование методом взрыва с образованием сверхвысоких давлений мгновенного действия с изменением кристаллохимического строения вещества. При способе пластического формования уплотнение осуществляется в ленточных прессах (чаще всего вакуумных) с последующей допрессовкой.

Изделия из пластических масс имеют повышенную пористость по сравнению с изделиями полусухого прессования. Свойства такой массы оцениваются методами реологии. Как уже отмечалось, основными параметрами пластичности служат: 1) вязкость наибольшей неразрушенной структуры (η_0), структурная вязкость (η), вязкость наименьшая при полностью разрушенной структуре (η_m). Поэтому $\eta_0 > \eta > \eta_m$; 2) предел текучести: условный статический $p_{к1}$, условный динамический $p_{к2}$, предел текучести p_k (см. рис 2.7). Имеются и другие характеристики реологических свойств массы в ее пластическом состоянии — мгновенный модуль упругости, эластичный модуль упругости, период релаксации и др. Комплекс таких характеристик позволяет устанавливать величину допустимых напряжений в процессе формования и уплотнения. Например, необходимо, чтобы напряжение сдвига в массе не превысило $p_{к2}$, при котором еще отсутствует полное разрушение структуры, так как это приведет в ленточном прессе к разрыву ленты массы, что в случае пластичной глины дает дефект в структуре, лишая ее оптимальности по этому критерию.

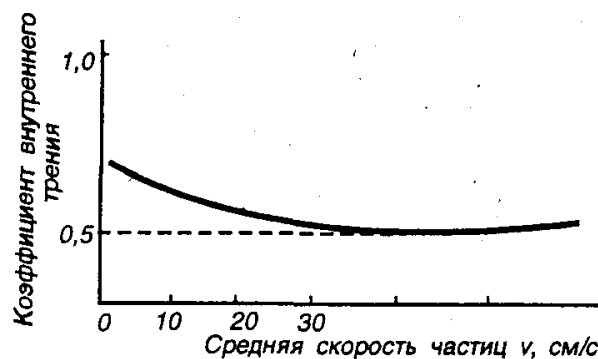


Рис. 2.8. Зависимость коэффициента внутреннего трения вибрируемой массы от средней скорости перемещения частиц, см/с: $v=A2f$, где A — амплитуда колебаний; f — частота колебаний, Гц

Самым характерным в технологиях с вибрационным формованием является придание скоростей и ускорений частицам массы и, как следствие, ослабление сил внутреннего трения и молекулярных связей, а также тиксотропное разрушение первичных структур (рис. 2.8). Частицы перемещаются относительно друг друга с плотной укладкой. Используют поверхностные, навесные, глубинные вибраторы, вибростолы, вибротрамбователи и т. д. Интенсивность вибрации выражают посредством виброускорения W , см/с:

$$W=A\omega^2=A\cdot 4\pi^2f^2, \quad (2.5)$$

где A — амплитуда колебаний (половина наибольшего размаха); ω — угловая скорость, рад/с; f — частота колебаний, Гц.

Произведение величин A и ω дает среднюю скорость движения частиц при вибрации. Имеются оптимальные значения амплитуды, виброускорения, что зависит от глубины проработки слоя массы. Вибрирование с ускорением, превышающим оптимальное, сопровождается разрыхлением и дифференциацией частиц по крупности. Разрыхление устраняют путем пригрузки при вибрации, например, до 8—10 МПа. Оптимальное время вибрирования определяют опытным путем.

При вибрационном прессовании достигается заданная пористость изделий при значительно меньших затратах энергии, чем при статическом прессовании. Кроме того, возрастает качество изделий, отсутствует анизотропия свойств, формируется более равномерная структура. Эффективность вибропрессования в ряде технологий повышается путем совмещения с вакуумированием.

В технологии обжиговых ИСК широко используют так называемое шликерное литье для получения тонкостенных изделий или изделий большого размера и сложной формы. Шликер — водная суспензия глин, каолинов, других тугоплавких веществ с частицами размером около 10^{-4} см, несущих определенный ионный потенциал $ИП = Z/r$, где Z — заряд катиона; r — его ионный радиус. При значениях $ИП = 65—100$ (суспензия из кислых материалов) получают повышенные значения плотности отливок, т. е. с относительной плотностью, равной 0,8—0,9¹. Способ шликерного литья является более зависимым от природы сырья, чем другие способы уплотнения.

При формовании и уплотнении нередко применяют торкретирование с переносом смеси к поверхности с помощью сжатого воздуха. Такой способ позволяет получать весьма плотный слой формуемого вещества. Однако следует учитывать, что при этом происходит неизбежная потеря используемой смеси в связи с отскоком частиц.

¹ Относительная плотность равна отношению величин средней плотности изделия к его истинной плотности.

2.2.4. ОБРАБОТКА ОТФОРМОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

К весьма значительному технологическому переделу, влияющему на структурообразование ИСК, как и других материалов, относится специальная обработка отформованных и уплотненных изделий с помощью одного, двух или большего количества внешних воздействий на материал в некотором последовательном или комбинированном порядке. Обработка может быть тепловой, тепловлажностной, химической, электрофизической, автоклавной, вакуум-пропиточной, радиационной (нередко совмещаемой с вакуум-пропиточной) и др. Основная цель обработок — обеспечить развитие процессов микро- и макроструктурообразования с возможно более полным переводом систем из метастабильного и мута-бильного состояний в термодинамически устойчивое. И хотя соответствующие процессы могут продолжаться и после произведенной обработки, в том числе в эксплуатационный период работы конструкции, однако их лавинная доля протекает на стадии обработки, реже — на стадии выдерживания изделий в обычных, «нормальных» условиях.

Эффективность обработки характеризуется постепенным или быстрым упрочнением структуры свежеизготовленных изделий с переходом ее в твердое или твердообразное состояние. Отвердевает в основном вяжущая часть, поскольку другая — заполняющая — часть конгломерата состоит из смеси уже твердых компонентов. В вяжущей части формируется либо одна, новая фаза, либо их может быть несколько. Новая фаза в виде химических соединений, возникающих под влиянием хемосорбционных реакций на поверхности твердых частиц или в растворе (расплаве), вначале появляется как скопление микророзродышей; в последующий период проходит кинетическое развитие центров реакции. Продукты химических реакций выделяются в самостоятельную фазу, концентрация которой со временем нарастает.

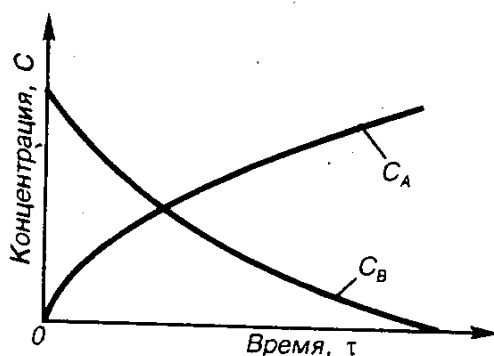


Рис. 2.9. Зависимость концентрации C веществ B и A от времени

Истинная скорость V химической реакции (в отличие от средней скорости) в данный момент времени является первой производной от концентрации (C) по времени (τ), т. е. $V = \pm dC/d\tau$. Знак в первой производной зависит от характера концентрации, а именно: минус — для одного из исходных компонентов, концентрация которого со временем снижается ($dC/d\tau < 0$); плюс — для одного из продуктов реакции, концентрация которого со временем растет ($dC/d\tau > 0$). На рис. 2.9 кривая C_B соответствует первому случаю, а кривая C_A — второму.

При сложных реакциях с участием в них двух и более простых реакций каждая из последующих протекает самостоятельно и к каждой из них применимы уравнения кинетики простых реакций.

Скорость химических реакций быстро возрастает с повышением температуры согласно уравнению Аррениуса:

$$\ln k = A/T + B, \quad (2.6)$$

где A и B — индивидуальные постоянные для данной реакции; T — абсолютная температура по шкале Кельвина; A — константа скорости реакции, по величине является обратной скорости реакции. Величина A по физическому смыслу пропорциональна энергии активации: $A = E^*/R$, где E^* — энергия активации, под которой понимается избыточное количество энергии (по сравнению со средним ее значением), которым обладает молекула в момент эффективного столкновения с другой при образовании химического взаимодействия; R — газовая постоянная).

Из уравнения следует, что константа скорости (k) реакции (а следовательно, и скорость реакции) изменяется с колебаниями температуры сильнее в тех реакциях, которые имеют повышенную энергию активации. При незначительной энергии активации скорость реакции слабо изменяется с ростом или падением температуры. Чтобы повысить энергию реагирующих молекул, т. е. активировать их, используют различные методы, назначаемые с учетом: природы веществ, кинетической энергии; повышения энергии взаимного колебания атомов в молекуле; повышения энергии движения электронов в атомах, например в результате разрывов валентных связей (в частности, при диссоциации молекул на атомы, поглощении электромагнитных колебаний и др.); активацией молекул с помощью электрического разряда; воздействия ультразвуковых колебаний и излучений, например световых потоков высоких энергий — рентгеновских, гамма-излучений и др.

Количественная зависимость скорости реакций от температуры выражается также приближенным правилом Вант—Гоффа, согласно которому при повышении температуры на 10°C скорость химических реакций увеличивается в 2—4 раза. Число, показывающее во сколько раз увеличивается скорость, называется температурным коэффициентом скорости реакции. Это правило возможно выразить формулой

$$v_2 = v_1 \gamma^{\frac{t_2 - t_1}{10}}, \quad (2.7)$$

где v_1 и v_2 — скорости реакций при температурах соответственно t_1 и t_2 ; γ — температурный коэффициент скорости реакции.

Скорость химических реакций зависит не только от температуры, но и от концентрации реагирующих веществ. В простейших случаях, когда имеются гомогенные реакции и протекают они в сильно разбавленных растворах (или в среде идеального газа), функционирует закон действия масс: при постоянной температуре скорость химической реакции пропорциональна произведению концентраций (c) реагирующих веществ, возведенных в степени их стехиометрических коэффициентов. Так, например, $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$, а $v = c_{\text{H}_2}^2 c_{\text{O}_2}$. Этот известный в химии закон лежит в основе химической кинетики,

но при сложных реакциях его действие становится менее надежным.

Не всегда с помощью регулирования концентраций реагирующих веществ и повышения температуры достигается желаемое ускорение технологического процесса на производстве. Большого эффекта можно достигнуть действием на реакционную систему катализатором излучений и других факторов.

В качестве катализаторов используют различные вещества, но специфичность их воздействия заключается в том, что каждая реакция ускоряется каким-то определенным катализатором, который не способен ускорять другие реакции, т. е. катализатор реакций участвует таким образом, что выходит на завершающей стадии в своем начальном виде и количестве. Действие катализатора приводит к образованию дополнительного количества химических соединений в единицу времени с увеличением объема новой фазы, чаще всего кристаллической.

Кроме химических реакций, к образованию новой фазы приводит кристаллизация растворенного вещества из пересыщенного раствора. Пересыщение возникает по разным

причинам: удаление части жидкой дисперсионной среды, например при выпаривании или испарении воды, спирта, эфиров или других растворителей; изменение температуры насыщенного раствора (обычно при ее понижении); изменение внешнего давления; химическое взаимодействие исходных компонентов в сложном растворе и др. Самое сильное влияние оказывает понижение температуры, поскольку растворимость многих веществ тогда падает, хотя некоторые вещества все же характеризуются и отрицательным коэффициентом растворимости, т. е. их растворимость снижается с повышением температуры раствора. В сложных растворах пересыщение часто связано с образованием новых химических соединений.

Пересыщенный раствор обладает сравнительно небольшой термодинамической устойчивостью. Его переход в относительно устойчивое состояние могут вызывать посторонние факторы: внесение «затравки» в виде мелкого кристаллика, укрупненных молекул, мицелл или при особом сочетании ионов растворенного вещества, взвешенных пылинок инородного тела, а также под влиянием механического воздействия, особенно ударного. Без иницирующих факторов метастабильное состояние системы может сохраняться длительное время; большая энергия активации, большой тепловой эффект и другие факторы затрудняют переход системы в устойчивое насыщенное состояние. Тогда возможна высокая степень перенасыщения раствора прежде чем из него самопроизвольно выделятся «зародыши» новой фазы.

По современным воззрениям, сначала появляются зародыши новой фазы в виде скопления малого числа атомов, образования ассоциаций частиц при столкновениях в растворе отдельных ионов (молекул) растворенного вещества. На последующей стадии рост зародышей приводит к появлению дискретных частиц субмикроскопических размеров. Но частицы-зародыши продолжают пока находиться в подвижном равновесии и видимой кристаллизации не происходит. Этот период характеризуется как скрытый, индукционный. Скорость образования субмикроскопических зародышей возрастает с повышением температуры, при перемешивании раствора, при механических внешних воздействиях (встряхивание, вибрация, ударение, трение и т. п.), в присутствии твердых включений с большой поверхностью (зерна, нити, ленты и др.). В кристаллизующую систему нередко вводят так называемые кренты — кристаллизационные компоненты-добавки, выполняющие функции затравок микророзродышей. Кренты способствуют интенсификации твердения (например, цементного теста) и улучшению качества микроконгломерата.

На определенном этапе частицы-зародыши достигают критического размера, при котором каждая обладает достаточной поверхностной энергией, чтобы вызвать дополнительное адсорбирование частиц растворенного вещества. Увлекаются и мельчайшие твердые частицы других веществ, находящихся в системе, в том числе частиц новообразований. Зародыши становятся, таким образом, 'центрами кристаллизации. Последние выделяются сначала в виде аморфных частичек, которые обычно с большой скоростью переходят в кристаллическое состояние с укрупнением за счет наслоения вещества на гранях кристалликов. По мере увеличения размера кристаллов окружающая фаза становится пересыщенной и, следовательно, неустойчивой по отношению к крупным кристаллам, но ненасыщенной для мелких и мельчайших кристалликов.

Согласно принципу Гиббса—Кюри, каждый кристалл при своем росте принимает такую форму, при которой суммарное значение его поверхностной энергии имеет наименьшее значение, т. е. $\sum \sigma \cdot S = \sigma_1 \cdot S_1 + \sigma_2 \cdot S_2 + \dots \rightarrow \min$ при $v = \text{const}$, где v — объем кристалла; S — поверхность различных граней кристалла; σ — их поверхностное натяжение. Чем ближе величины поверхностной энергии граней между собой, тем¹ ближе многогранник к сферической форме, а при весьма редко встречающихся случаях, когда поверхностная энергия граней одинакова, т. е. $\sigma_1 \cdot S_1 = \sigma_2 \cdot S_2 = \dots = \sigma_n \cdot S_n$, кристалл принимает форму шара. При других зависимостях скорости роста от реальных условий кристаллизации возможно

образование иных форм и структуры кристаллов — многогранных, пластинчатых, игольчатых, дендритовых (древовидных) и т. д.

Не остается постоянной растворимость кристаллического вещества, возрастая с повышением его дисперсности. При контакте с насыщенным раствором крупные кристаллы еще более укрупняются за счет растворения мелких. В результате этого непрерывного процесса крупные кристаллы сравнительно быстро могут достичь размера, при котором поверхностные силы этой части кристаллов (кристаллических агрегатов и сростков) практически перестают влиять на общее равновесие системы. Такое состояние крупных кристаллов (сростков) адекватно как бы выходу фазы из системы. Вследствие этого появляются условия для нового пересыщения раствора и возникновения зародышей новой фазы, образования новых, возрастающих по размеру кристаллов до следующего выхода кристаллических сростков из этой метастабильной системы. Повторение такого рода периодических циклов приводит к полному переводу раствора в кристаллическое состояние. Скорость спонтанного перенасыщения до возникновения зародышей новой фазы и кристаллизации падает при понижении температуры, а при достаточно большом переохлаждении раствора скорость становится ничтожно малой. Тогда некоторые жидкости переходят в стеклообразное состояние с мало упорядоченным расположением частиц и избыточным запасом внутренней энергии.

Возникновение и рост кристаллов и кристаллических агрегатов могут происходить также из газообразного состояния вещества, минуя жидкую фазу, например при резком понижении температуры или резком повышении давления. Такой своеобразный вид кристаллизации за счет возгонки (сублимации) и последующего охлаждения и конденсации газа (десублимации) является характерным для некоторых ИСК, в которых присутствуют газы или пары, например нафталина, воды, хлористого магния, аммонийных солей и др. Но процесс десублимации нередко отсутствует, и тогда из строительного конгломерата (например, на основе дегтевого вяжущего вещества) удаляется кристаллическая фаза путем необратимой возгонки с частичной потерей положительных свойств материала, например плотности, прочности.

На свойства кристаллов оказывают влияние не только форма, размер или природа кристаллизующегося вещества. Так, например, примесь поверхностно-активных веществ в растворе в очень небольших количествах может приостановить рост кристаллов даже при высоких степенях пересыщения раствора или, наоборот, способствовать их росту. Формированию крупных кристаллов способствует медленный их рост и небольшие степени пересыщения. Перемешивание при кристаллизации благоприятствует диффузионному переносу вещества к граням кристаллов и их росту, но вместе с тем вызывает образование зародышей и, следовательно, накопление мелких кристаллов. Разные режимы вибрации в технологии вносят свои существенные коррективы в процесс кристаллизации.

В обжиговых конгломератах вяжущей частью служат расплавы как своеобразные разновидности химических растворов, обусловленных определенными внешними факторами. Переход из жидкого в твердое состояние при охлаждении происходит также под влиянием кристаллизации компонентов. В более редких случаях происходит постепенный переход из жидкого состояния в твердое, аморфное, стеклообразное, т. е. жидкость становится переохлажденной. Переохлаждение жидкости легче протекает при отсутствии в ней посторонних взвешенных твердых частиц, растворенных газов или пузырьков воздуха, а также при полном покое. Внесение твердой частицы того же вещества или тем более кристаллика приводит к незамедлительному процессу кристаллизации переохлажденного расплава с превращением его полностью в кристаллическое состояние. При этом молекулы перестраиваются из хаотического беспорядка в упорядоченное, обуславливаемое кристаллической решеткой.

Процесс кристаллизации из расплавов начинается и заканчивается при определенных температурах, что зависит от входящих в расплав компонентов. В расплаве может происходить самопроизвольная кристаллизация сначала в отдельных точках, создавая

анизотропную структуру, а затем заполняя постепенно весь объем. Для каждого вещества имеется оптимальная температура, при которой создается наибольшее количество центров кристаллизации. При более высокой температуре происходит дезориентация молекул, случайно получающих организованное кристаллическое состояние, а при пониженных температурах возрастает вязкость, препятствуя перемещению молекул и их правильной ориентации в системе с формированием кристаллов. Оптимальные температуры образования наибольшего количества центров кристаллизации при остывании расплава не совпадают, как правило, с наибольшей скоростью кристаллизации, смещаясь относительно друг друга.

К большинству расплавов, которые в качестве связующего вещества участвуют в образовании ИСК, применим всеобщий закон эвтектики. Сущность его состоит в стремлении расплава к такой смеси компонентов, при которой обеспечивается переход расплава при застывании в твердое состояние при самой низкой, эвтектической, температуре.

Расплавы начинают кристаллизоваться с того компонента, который имеется в расплаве в избытке, самопроизвольно сбрасывая избыток этого компонента в виде кристаллической фазы и приближая остаток расплава к составу эвтектики, которая и достигается при понижении температуры. Фазовый состав образующихся кристаллических веществ определяется диаграммами состояния. Когда компоненты расплава нерастворимы между собой, то температуры начала кристаллизации следуют по линиям, пересекающимся в точке. Она характеризуется эвтектической температурой и эвтектическим составом. В этой точке при строго определенном фазовом составе может существовать как жидкая, так и твердая эвтектика, т. е. отвердевание расплава происходит при постоянной температуре. Для тех сплавов, в которых компоненты обладают некоторой взаимной растворимостью, характерно образование твердого состояния по линии солидуса с кристаллами как чистых компонентов, так и содержащих небольшие количества растворенного в них другого твердого компонента. В системах могут появляться новые соединения, возникающие в результате химического взаимодействия исходных компонентов. Некоторые новые кристаллические соединения могут обладать температурой плавления более высокой, чем температуры плавления чистых компонентов. Для таких сложных систем на общих диаграммах состояний появляются две эвтектические точки, так как кроме двух обычных чистых компонентов появляется средняя промежуточная, соответствующая новому химическому соединению с более высокой температурой его плавления. Подобные соединения между компонентами в различных системах образуются сравнительно часто, а при расплавлении они переходят в жидкий расплав того же состава (конгруэнтное плавление) или же кристаллическое соединение при плавлении обратимо разлагается, образуя жидкость другого состава и новую твердую фазу (инконгруэнтное плавление).

Если в физико-химической системе имеется не два, как было отмечено выше, а три компонента и более, то процесс кристаллизации расплава при постепенном снижении температуры еще более усложняется. В этой системе появляется эвтектика, состоящая из трех или большего числа компонентов. Могут возникать новые химические соединения с характерными для них температурами плавления, твердые растворы и т. п. Возникают многообразные системы, состав которых наиболее полно изучают с помощью дифференциально-термического анализа и других физических методов.

Как отмечалось, расплав переходит в твердое состояние постепенно или быстро, что зависит от внешней температуры, выделяя кристаллы переменного состава, и только в эвтектике возникает мгновенно твердое состояние расплава, т. е. сплав. Возможно, однако, что в исходном состоянии расплав уже имел кристаллы, не перешедшие при данной температуре нагрева системы в жидкое состояние. Тогда общая масса остывает в присутствии этих кристаллов, переходящих в затвердевший материал в виде вкраплений, весьма характерных для так называемых порфировых структур горных пород. Если расплав остывает быстро, то процессы кристаллизации полностью не успевают пройти, а в

получаемом твердом веществе сохраняется в том или ином количестве стекловатая часть (стекло).

В расплавах, как и в обычных растворах, нередко присутствует газовая фаза, которая образуется или в ходе химических реакций как основной или промежуточный продукт, или под влиянием испарения отдельных ингредиентов, находясь в смеси в виде пара, или вследствие возгонки (сублимации), минуя переход в жидкое состояние. В результате возникают твердые системы с включением в их поры газовой фазы.

При изменении параметров среды (давления и температуры) физико-химическая система может перейти из установившегося устойчивого равновесия, соответствующего правилу фаз Гиббса, в неустойчивое с возможным выделением новых твердых фаз, изменением фазового состава и структуры. В этом отношении менее устойчивыми являются кристаллы, деформированные стесненными условиями их роста, а также кристаллические тела в измельченном состоянии в виде осколков кристаллов. Тогда вещество обладает большей химической активностью и меньшей химической стойкостью, большей способностью к фазовым превращениям, большей растворимостью и др. Аморфное состояние всегда менее устойчиво по сравнению с кристаллическим. Многие вещества способны существовать в различных модификациях, т. е. имеют склонность к полиморфизму при повышении или понижении температуры (обжиг, охлаждение).

Процессы кристаллизации при формировании структур ИСК являются наиболее типичными. В идеализированных условиях кристаллы образуются из закономерно расположенных в них микрочастиц — атомов, ионов, молекул. Характер этой закономерности расположения микрочастиц обусловлен составом вещества, а связи между частицами кристалла могут быть разнообразными, в том числе комбинированными по разным частям тела.

Кристаллы с ионной связью (ионной решеткой) обладают сравнительно высокими температурами плавления. Ионная связь характеризуется тем, что ионы связи обусловлены электростатическим притяжением противоположно заряженных ионов (катионов, анионов).

При ковалентной связи кристаллы обладают обычно высокой твердостью, весьма высокими температурами плавления. Направленная ковалентная связь выражается & том, что тесно сближенные атомы передают один или большее число электронов на образование устойчивых наружных электронных оболочек, с помощью которых и осуществляется между ними связь. Ковалентная связь может быть неполярной, когда взаимодействующие атомы принадлежат сравнительно одинаковым элементам, и полярной, когда электронная оболочка (электронная пара), связывающая атомы, принадлежит им не в одинаковой степени, а как бы смещена к одному из них, находясь большее время около него. Полярная связь относится к промежуточной между ионной (в ней тоже как бы образуется электронная пара) и неполярной связями.

Кристаллы с молекулярными кристаллическими решетками обладают сравнительно низкими температурами плавления, малой твердостью, значительной летучестью, особенно органические соединения (например, нафталин и др.).

Кроме кристаллов с типичными формами связи, включая металлические, существуют переходные и смешанные формы связи. В состав ионных кристаллов могут входить, например, некоторые нейтральные молекулы, располагающиеся между ионами или слоями ионов (например, молекулы воды). Имеются и другие отклонения в структуре и химическом составе кристаллов с появлением дефектов, посторонних атомов и ионов в виде примесей внедрения и примесей замещения. В реальных условиях неизбежно появляются причины к изменениям внешней формы и внутреннего строения кристаллов, что оказывает сильное влияние на их свойства, особенно на механическую прочность. Еще большее влияние на свойства оказывает характер установившегося контакта и связей между отдельными кристаллами, особенно, когда они состоят не из одного, а из двух, трех и большего числа их видов, например, в твердых сплавах или в продуктах кристаллизации

из сложных растворов. Значительное влияние на прочность, деформативность и другие свойства оказывает контактирование кристаллов или их обломков через тонкие прослойки инородного вещества, нередко находящегося в стеклообразном состоянии.

Стеклообразные вещества характеризуются, во-первых, изотропностью (большинство кристаллов отличаются анизотропностью, т. е. векториальностью свойств) и, во-вторых, способностью при нагревании переходить постепенно в жидкое состояние. Известно, что кристаллическое вещество полностью переходит в жидкое состояние при одной, характерной для него постоянной температуре. Возможен самопроизвольный переход вещества из стеклообразного в кристаллическое состояние, сопровождаемый выделением в небольших количествах теплоты, преодолением энергетического барьера, связанного с образованием вокруг частиц двойных адсорбционных и ионных оболочек, прослоек среды повышенной вязкости. В технологии этот барьер нередко преодолевается наложением дополнительных механических воздействий на твердеющую систему.

В различных видах вяжущего вещества устанавливаются после отвердевания системы определенные соотношения объемов кристаллической и аморфной (стеклообразной) фаз, которые под действием эксплуатационных факторов могут претерпевать отклонения как за счет дополнительного выделения новообразований, так и за счет упорядочения в расположении частиц (атомов, ионов, молекул) стекловатой фазы с постепенным переходом ее в кристаллическое, в той или иной мере деформированное, состояние.

К процессам структурообразования и сопутствующим им явлениям относятся также контракция и усадка, экзотермический и эндотермический эффекты, релаксации и ретардации.

Контракция состоит в самопроизвольном сжатии системы с уменьшением ее первоначального объема в основном в связи с образованием новых химических соединений (химическая усадка) с переходом некоторой доли объемной (свободной) жидкой среды в химически связанное состояние. Поскольку продукт реакции является, как правило, новой фазой микро- и макроструктуры, то возникающая пористость (контракционная) оказывает существенное влияние на качество этой материальной системы. При высокой реагирующей способности компонентов формирующегося сложного материала контракция может составлять до 30% и более общего объема микродисперсных пор (мельче 0,1 мкм). С усложнением состава вяжущего вещества и повышением тонкости его помола растет суммарный объем контракционных пор.

Усадка — уменьшение в объеме, которое происходит под влиянием сжимающих капиллярных сил, перехода твердых компонентов в жидкое состояние с последующим заполнением пор и пустот жидкой средой, испарения части жидкой среды или ее синерезиса (выпотевания), снижения температуры (охлаждения), в том числе вследствие эндотермического эффекта. Общая усадка состоит из физической и химической усадок.

В отдельных материальных системах вместо усадки наблюдается разуплотнение с увеличением объема конгломерата или вяжущей части. Это явление происходит вследствие: набухания, полиморфного превращения, химического или физико-химического присоединения большого количества жидкой среды с увеличением в объеме аморфных или кристаллических новообразований, расширения объема при повышении температуры, в частности за счет экзотермических эффектов.

В результате усадки и набухания, тем более повторяющихся в технологический период изготовления конгломерата или в эксплуатационный период, нередко возникают самопроизвольные напряжения в материале и, как следствие, микротрещинообразование с возможным ухудшением физико-механических свойств строительных изделий. Различными приемами — регулированием режима отвердевания, введением дополнительных компонентов в смесь и др. — удастся уменьшить или полностью исключить влияние усадочных напряжений или деформаций, связанных с разуплотнением структуры.

Тепловые эффекты обусловлены химическими реакциями и физическими модификациями. Эндотермические эффекты возникают при разрушениях кристаллической решетки или испарении жидкости, полиморфных превращениях (инверсии) вещества. Экзотермические эффекты и реакции обуславливаются образованием новых фаз, сопровождаются поглощением газовой среды, переходом неустойчивого аморфного состояния в кристаллическое.

Релаксация и ретардация — соответственно процессы самопроизвольного снижения напряжения при фиксированной деформации и изменения деформации при фиксированном внутреннем напряжении. То и другое происходит под влиянием перемещений атомов, ионов, молекул, отдельных звеньев молекулярных цепей. В структурообразовании ИСК эти спонтанные процессы имеют как положительное (снятие избыточных напряжений с предотвращением трещинообразования), так и отрицательное значение (ослабление прочности некоторых соединений в конструкциях, разупрочнение конструкции вследствие спада ранее приложенных напряжений в армирующих элементах, например в предварительно напряженных железобетонных конструкциях). Во всех случаях эти процессы и характеризующие их параметры (время релаксации, коэффициент релаксации и др.) учитывают в расчетах ползучести и прочности элементов строительных конструкций.

Таким образом, комплекс сложных процессов и явлений, возникающих и развивающихся в период технологических переделов до определенного уровня, а затем постепенно угасающих (в обжиговых ИСК быстрее, чем в безобжиговых), позволяет получать изделие из подготовленных и отдозированных компонентов. Подавляющее количество процессов и явлений из этого комплекса характерно для вяжущей части конгломерата, поскольку именно ее компоненты к моменту объединения, находясь в твердом, жидком или газообразном состоянии, наиболее активны. Структурообразование искусственного конгломерата условно возможно расчленить на множество более простых процессов и явлений, подобно тому как сложные химические реакции представляют собой определенное — параллельное или последовательное — сочетание простых реакций. Преобладающую роль в структурообразовании играют процессы, обеспечивающие формирование и отвердевание вяжущей части, т. е. микроструктуры конгломерата. На стадии макроструктурообразования особая роль принадлежит процессам взаимодействия по границам раздела структурных элементов с отвердеванием всей системы ИСК и с оформлением готового изделия. Структура такого изделия отныне становится единой, монолитной (см. 2.2.5). В расчетных схемах ее нередко, но условно представляют как состоящую из микро- и макроструктурных частей.

Чтобы технологические переделы были эффективными, а качество продукции — более высоким, обосновывают их оптимальные режимы и параметры на всех основных стадиях производства. Обычно их устанавливают опытным путем, хотя этот метод становится не достаточным при возрастании габаритов выпускаемой продукции. Поэтому вводят определенные расчетные модели, в которых имитируют состояние и поведение реальных конгломератных смесей (масс). Основной реологической характеристикой в этих расчетах и исследованиях служит вязкость предельно разрушенной или полностью ненарушенной структуры (ньютоновские вязкости), а также частично разрушенных структур (структурная, или бингамовская вязкость). Вторая реологическая характеристика — предельное напряжение сдвига — позволяет описывать уравнением напряженное состояние смеси (массы) при оптимизации технологических режимов и параметров.

Спонтанно протекающим в технологическом процессе переделом является отвердевание конгломератной системы, в первую очередь ее вяжущей части. Но отвердевание, являясь комплексом сложных процессов, остается мало доступным для визуальных наблюдений. Поэтому ниже предложена гипотетическая общая теория отвердевания ИСК.

2.2.5. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТВЕРДЕВАНИЯ МАТРИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В ИСК

Отвердевание — сложный процесс перехода матричного вещества ИСК из жидкого или жидкообразного (вязко-пластичного) состояния в твердое. У безобжиговых конгломератов вязущая часть обнаруживает первые признаки отвердевания еще на стадии ее перемешивания, когда возникают ассоциации молекул или химических соединений, которые сопутствуют структурообразованию на последующих этапах технологии. Лавинный характер нарастания симптомов начавшегося и развивающегося отвердевания характерен для этапа специальной обработки. У обжиговых конгломератов процесс отвердевания занимает, как правило, укороченный период времени по сравнению с безобжиговыми и проходит, в основном, при охлаждении изделий, отлитых или отформованных полностью или частично из расплава, а также спекаемых при обжиге. Но и здесь образование отдельных структурных элементов и химических соединений происходит еще на стадии расплавов с переходом их в отвердевший сплав.

Каждая разновидность неорганических и органических вяжущих веществ (более подробно см. в гл. 3) отвердевает под влиянием специфических факторов. Все вяжущие вещества отвердевают под влиянием ряда общих факторов, что придает процессу отвердевания закономерный характер, позволяет направленно управлять им и структурообразованием в целом. Сформировавшееся твердое тело характеризуется стабильностью структуры и фиксированным положением в нем частиц на достаточно малых друг от друга расстояниях.

В сложном процессе отвердевания вяжущих веществ, составляющих матричную часть структуры конгломератов, можно условно выделить две стадии, характеризующиеся противоположными изменениями в отвердевающей системе: диспергирование — на первой стадии, конденсацию и консолидацию — на второй. Теоретически вторая стадия во времени следует за первой, но практически нельзя провести четкой границы между ними, так как многие явления, характерные для второй стадии, нередко сопутствуют первой, и наоборот. Обе стадии в какой-то мере накладываются друг на друга, хотя и имеют ярко выраженные отличительные особенности.

Первая стадия процесса отвердевания отличается массовым переходом твердого или твердообразного вещества, входящего в компоненты матричной части ИСК, в состояние высокой дисперсности до размеров молекул, атомов, ионов или более крупных макромолекул, ассоциатов атомов, агрегатов и т. п. Такое диспергирование¹ благоприятствует переводу частиц в системе в наименее устойчивое, метастабильное и в то же время в наиболее энергетически активное состояние. Эти условия способствуют свободному перемещению частиц с неизбежным тепловым движением их в окружающей среде, образованию при столкновениях под действием энергии активации ранее отсутствовавших соединений, ассоциаций и агрегатов, новых фаз и других микроструктурных элементов. Новообразования возникают нередко столь быстро, что они появляются и накапливаются в системе на первой стадии массового диспергирования.

Переход веществ в состояние высокой дисперсности в технологический период производства ИСК происходит под влиянием раз личных факторов: химических (гидролиз), механических, тепловых, физико-химических (пептизации), электрических и др. Наиболее характерными для вяжущих веществ оказываются: растворение в жидкой среде, расплавление при высокой температуре, механическое измельчение (например, в коллоидных мельницах). При всех методах перевод вещества в новое агрегатное состояние обычно сопровождается расходом энергии от внешнего источника и частичным ее поглощением возникающей новой дисперсной системой. Эта система становится более энергетически активной с возрастанием неуравновешенности ее состояния. Подобные высокодисперсные системы образуются в виде истинных и коллоидных растворов,

¹ Более точно — диссолюция.

суспензий или суспензоидов, гомогенных и гетерогенных расплавов, иногда -эмульсий и эмульсоидов, а также пен. Еще большее значение для первой стадии имеет не различие в агрегатном состоянии частиц, а характер и интенсивность взаимодействия их с молекулами дисперсионной среды.

Вторая стадия отвердевания является основной и характеризуется постепенным или ускоряющимся процессом перехода неуравновешенной системы в новое качественное состояние — твердый камневидный продукт с относительно стабильной и упорядоченной микроструктурой с частичным формированием кристаллической фазы. По мере упорядочения структуры с укрупнением микрочастиц до макроскопического размера уменьшается свободная энергия системы. При стабильном кристаллическом состоянии отвердевшего матричного вещества она становится минимальной, оставаясь более значительной в аморфном веществе. Но стремление системы к минимуму сохраняющейся в них свободной энергии за счет перехода в кристаллическое состояние не всегда остается реализованным в технологических условиях.

Ниже кратко рассматриваются основные высокодисперсные системы и их поведение на обеих стадиях отвердевания.

Система «чистой» среды. К таким системам относятся дисперсии, в среде которых на первой стадии отвердевания не произошло каких-либо растворов твердой фазы. Типичными представителями таких систем являются вода или водная суспензия, состоящая полностью из нерастворимых в ней твердых частиц; металл, свободный от примесей, находящийся в жидком, расплавленном состоянии. Отвердевание таких систем происходит при понижении температуры. При этом вода скачкообразно превращается в кристаллы льда, а вместе с инертным твердым компонентом (в случае водной суспензии) — в своеобразный искусственный конгломерат с кристаллической матрицей — лед. Металлическая кристаллическая решетка присуща элементарным металлам. В этих системах микроструктура переходит из жидкой в твердую и полностью упорядоченную — кристаллическую.

Система с полностью растворенным твердым веществом типа электролита (истинные растворы). В истинных (молекулярно-дисперсных) растворах частицы представлены атомами, ионами, молекулами растворенных или ассоциированных вязущих веществ, к которым относятся соли — электролиты и основания. Для истинных растворов наиболее типичным растворителем служит вода (или водные растворы некоторых химических веществ), в которой частицы растворенного вещества распределены равномерно и составляют одну фазу, т. е. образуется гомогенная система. Растворимость твердых частиц в среде увеличивается с повышением температуры, а сам процесс растворения должен быть эндотермическим и сопровождаться поглощением энергии. В реальных условиях, однако, при переходе некоторых вязущих веществ в истинный раствор часто наблюдается энергетический эффект, выражающийся, например, в повышении температуры раствора. Это свидетельствует о том, что в системе происходят не только агрегатные превращения, но и химическое взаимодействие вязущих веществ с растворителем (водой). Повышение температуры вызывает увеличение беспорядочности теплового перемещения частиц раствора и способствует новому взаимодействию между самими диспергированными частицами, а также между последними и растворителем. Возникают новые соединения и фазы, которые хотя и появляются на первой стадии отвердевания, но более типичны для второй. Образующиеся химические соединения и фазы характеризуются различными типами связи, что зависит от состава растворенного вещества и реагирующей с ним среды. Наиболее типичными для этих систем являются ионные и ковалентные связи с формированием при кристаллизации соответствующих кристаллических решеток. Кристаллическая фаза формируется постепенно. Процесс ее образования начинается с появления микрзародышей как центров реакции и их развития с увеличением в размерах до выделения на более позднем этапе мельчайших кристалликов. На поверхности этих кристалликов или зерен, как своеобразной подложке, возникают новые кристаллические

образования того же или другого химического состава. Закономерное нарастание кристаллического вещества на подложке известно как проявление так называемой эпитаксии¹.

Другой вариант формирования устойчивой микроструктуры — кристаллизация из пересыщенных растворов. Выделению кристаллов предшествует стадия появления зародышей в виде упорядоченного скопления небольшого числа атомов и ассоциаций молекул, которые становятся центрами, из пересыщенных растворов.

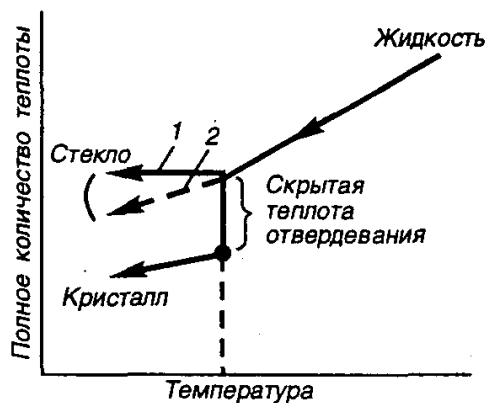


Рис. 2.10. Переходы жидкости в кристалл и стекло:
1 — при быстром охлаждении, 2 — при медленном охлаждении

При охлаждении жидких растворов образуются кристаллы, в узлах решеток которых располагаются попеременно частицы (ионы, атомы, молекулы) различных растворенных веществ. При сходстве кристаллических составляющих веществ они растворимы друг в друге в твердом состоянии (твердые растворы). При неполном взаимном растворении веществ в твердом состоянии возникает неоднородный конгломерат из двух или большего количества твердых фаз.

Кроме кристаллической фазы могут образовываться твердые фазы с менее упорядоченным или вовсе неупорядоченным расположением микрочастиц (стеклофазы). В них сохраняется избыточный запас свободной энергии и, следовательно, имеется тенденция к дальнейшему упорядочению микроструктуры при благоприятных к тому условиях (рис. 2.10).

Система типа коллоидных растворов. Эти растворы чаще называют золями, а при наличии водной среды — гидрозолями. Они состоят из частиц размерами до 2-КН м и представляют собой микрогетерогенные системы с огромной суммарной поверхностью частиц. Поверхность служит границей раздела с растворителем и обуславливает развитие внутри системы адсорбционных процессов. Характерным для коллоидных растворов является взаимодействие их частиц с молекулами жидкой среды. В процессе диспергирования вязущего вещества до коллоидных размеров в жидкой среде возможна коагуляция, которая более типична для второй стадии отвердевания. Она означает самопроизвольное укрупнение частиц в агрегаты, вследствие чего происходит некоторое наложение процессов первой стадии, отвердевания на процессы второй стадии подобно тому, как это наблюдается в истинных растворах.

Конденсация этих систем связана с постоянной тенденцией к снижению большого запаса свободной поверхностной энергии за счет агрегирования частиц посредством в основном молекулярных (ван-дер-ваальсовых) сил связи. Естественно, что этот процесс конденсации происходит самопроизвольно и сопровождается отдачей энергии. Побудителем к отвердению коллоидного раствора может быть снижение температуры, при которой появляется состояние пересыщения раствора, возникают зародыши в виде аморфных

¹ Эпитаксия — ориентированный рост одного монокристалла на поверхности другого (подложки).

микрочастиц. Они с большей или меньшей скоростью переходят в относительно упорядоченное (скрытокристаллическое) положение. Рост частиц новой фазы сопровождается тем, что среда по отношению к ним становится пересыщенной, вследствие чего возрастают скорость и интенсивность укрупнения частиц структурирования всей системы.

Следует отметить, что упомянутая выше коагуляция, также самопроизвольно протекающая в этой системе, благоприятствует укрупнению (с понижением энергии) и образованию структуры типа гель. В этом студнеобразном продукте удерживается значительная часть дисперсионной среды, а иногда гель и полностью связывает ее. Но она может снова самопроизвольно выделять среду (явление именуется синерезисом) с уплотнением геля и уменьшением его объема. При неоднородном коллоидном растворе в процессе образования геля может выделяться кристаллическая фаза. В целом система относительно стабилизируется и отвердевает. Гели по своим свойствам разделяются на хрупкие и эластичные.

Ближе к истинным, чем коллоидным, растворам находятся системы с очень крупными, но не одинакового размера молекулами, преимущественно линейной формы. При отвердевании таких систем происходит упорядочение линейной структуры. Кроме ковалентной, как наиболее распространенной прочной связи, в ней представлены водородные и молекулярные (например, дисперсионные) связи. Упорядочение такой структуры, нередко локального характера, происходит до образования кристаллов, что выражается в строго регулярном расположении линейных молекул.

Система типа суспензий. Суспензии относятся к более грубодисперсным взвесям, чем коллоидные растворы. В них твердая фаза — диспергированные частицы — остается в твердом состоянии в виде мелких кристаллов, а чаще — обломков кристаллических и аморфных веществ, практически нерастворимых или труднорастворимых в жидкой среде. Концентрированные суспензии обычно называют пастами или тестом.

Твердая фаза суспензий может осаждаться в жидкой среде с тем большей скоростью, чем ниже концентрация суспензии, больше размеры частиц, ниже плотность и вязкость среды, выше температура. Явление осаждения твердой фазы известно под названием седиментации, которое может предотвращаться перемешиванием. Если твердые частицы представлены неоднородными агрегатами, то возможно их селективное (т. е. выборочное) растворение в среде с распадом агрегатов на составные мелкие части, которое сопровождается переходом их в молекулярно-дисперсное (истинное) или коллоидное состояния с последующей электролитической диссоциацией молекул на ионы.

Строение суспензии как дисперсной системы при этом становится более сложным, так как в ней кроме твердых нерастворимых появляются коллоидные и молекулярные дисперсные частицы, а также ионы распавшихся молекул. По мере измельчения частиц (чему способствуют обычно тепловые, вибрационные и другие внешние факторы) усиливается броуновское движение, возрастает число соударений частиц в единицу времени с образованием новых фаз и агрегатов, что в массовом количестве наблюдается, однако, на второй стадии отвердевания. Процесс взаимодействия растворенных частиц между собой и с молекулами дисперсионной среды (обычно воды) интенсифицируют тепловлажностной обработкой, автоклавированием и другими видами технологических воздействий на отвердевающую суспензию (пасту)..

Под влиянием внешних факторов и в большей мере самопроизвольно лавинно развивается комплекс химических реакций с образованием новых соединений и фаз. Возникают кристаллические (через реакции и пересыщение раствора) и аморфные вещества, которые в совокупности формируют отвердевший микроконгломерат. В нем обычно представлены различные новообразования в виде кристаллов и геля при их определенных соотношениях по массе. Последнее зависит от исходного вяжущего вещества, концентрации суспензии (пасты), внешних условий и др. Возможен переход некоторой части исходных твердых веществ в микроконгломерат как матрицу конгломерата без заметного изменения состава.

Следует отметить, что типичными представителями веществ, отвердевающих по этой схеме, являются портландцемент и его разновидности.

Система расплавов. Расплавы представляют собой жидкости, получаемые при высокотемпературном нагревании силикатов, алюмосиликатов, фосфатов или иных исходных твердых веществ с переходом в другое агрегатное состояние либо полной их массы, либо только ее легкоплавкой части.

Нагревание и плавление сырьевых продуктов приводит к термической диссоциации молекулярных соединений, радикалов и других частиц на более простые. Они приобретают повышенную активность к последующему взаимодействию между собой с образованием новых соединений и фаз.

Важную роль играет вязкость расплава, зависящая от состава сырья и температуры. С понижением вязкости расплав теряет в возрастающей мере первоначальную упорядоченность структуры и, вместе с тем, в нем ускоряется перемещение микрочастиц. Расплав становится высокотемпературным вязущим веществом; в нем повышается уровень свободной и поверхностной энергий.

При последующем понижении температуры в расплаве возникают более устойчивые соединения, из которых формируется кристаллическая фаза, массовое образование которой относится ко второй стадии отвердевания.

Кристаллизация охлаждающего расплава начинается при определенной температуре, соответствующей температуре плавления данного вещества и появлению наибольшего количества микрозародышей. Из расплава в первую очередь выделяется избыточный компонент, который, самопроизвольно сбрасывая этот избыток в виде новой кристаллической фазы, приближает его остаток в расплаве при дальнейшем постепенном понижении температуры к составу эвтектики. В эвтектических точках возможна одновременная кристаллизация двух-трех фаз и более. При этом сначала кристаллизуются вещества, содержащие ионы высокой валентности с малыми радиусами, обеспечивающими наиплотнейшую упаковку в кристаллических решетках.

При отвердевании расплавов проявляется закон эвтектики: стремление к такой смеси, которая обеспечивается его переходом в твердый сплав при самой низкой (эвтектической) температуре.

Многие расплавы силикатов, алюмосиликатов, боратов и другие способны переохладаться, переходя в твердые стекловидные вещества. Чем больше скорость охлаждения, тем быстрее наступает состояние переохлажденной жидкости (стекла). Примерно при вязкости 10^{13} — 10^{12} Па·с стекловидное вещество переходит в хрупкое состояние, что соответствует температуре стеклования. При такой огромной вязкости стекло не изменяет своей аморфной структуры. Процесс отвердевания (кристаллизация и переохладение до стеклофазы) можно ускорять, например, вибрацией, введением катализаторов, облучением радиоактивными веществами, (З-лучами).

В расплавах, как и в растворах, может присутствовать газовая фаза как основной или побочный продукт химических реакций. Она может появиться также под влиянием порообразующих добавок, испарения и т. п. В этих случаях поры вязущего вещества в большей или меньшей мере наполняются газом, что может сопровождаться новыми химическими реакциями с выделением новых фаз.

Система вязущих контактного твердения. К этой системе относятся вязущие аморфной и нестабильной кристаллической структуры, которые способны конденсироваться в момент возникновения контактов между частицами при сближении их на расстоянии поверхностных сил притяжения. Окаменение этих вязущих не связано с химическими процессами и изменением объема твердой фазы. Обеспечение более прочных контактов между частицами вязущего достигается путем приложения внешнего давления. При малых давлениях полезно в системе присутствие очень малых количеств жидкой среды как своеобразной смазки. Самым важным для этой системы является получение вещества в нестабильном, кристаллическом или аморфном состояниях.

Поэтому на первой стадии отвердевания производятся технологические операции, обеспечивающие образование неупорядоченной структуры. С этой целью, в зависимости от вида исходного сырья, применяют термическую обработку до удаления кристаллизационной воды и максимальной аморфизации вещества, глубокую гидратацию без образования кристаллической фазы и др. Отвердевание (или точнее окаменение) порошкообразного вяжущего происходит в момент возникновения прочных связей между частицами аморфного вещества и упорядочения структуры по границам контакта с переводом метастабильного состояния в устойчивое.

На второй стадии отвердевания матричного вещества, во всех возможных системах, к которым относятся реальные вяжущие вещества в микро- и макроструктурных строительных конгломератах, процессы завершаются большим или меньшим упорядочением, снижением энтропии, переходом системы в относительно более устойчивое, по возможности, в кристаллизационное состояние. Но вторая стадия не завершается только конденсацией веществ; на этой стадии прошли еще и процессы консолидации — упрочения, укрепления вновь образующейся структуры на микро- и макроуровнях. Процесс второй стадии отвердевания является следствием того, что происходят непрерывные качественные и количественные изменения жидкой среды (с) и твердой фазы (ф) в системе.

К завершающему этапу отвердевания количество жидкой среды в системе становится минимальным, а количество твердой фазы — максимальным, т. е. величина отношения с/ф постепенно уменьшается, приближаясь к некоторому оптимальному значению. Существенно изменяются и их качественные характеристики. Часть жидкой среды (с) из свободного состояния переходит в химически связанное, коллоидно-сольватированное, переохлажденное (стеклообразное) состояние, парогазообразную фазу и др. Некоторая часть оставшейся жидкости в свободном состоянии растворяет лиофильные ингредиенты смеси, становясь метастабильным раствором. Твердая фаза (ф) изменяет свой молекулярный состав и микроструктуру с переходом, как правило, к другим типам связи по сравнению с исходным твердым веществом. Она в различных системах может находиться в кристаллическом, кристаллитном, аморфном, стеклообразном или гелеобразном состояниях. Возможно иногда удаление некоторой части твердого вещества из системы за счет сублимации (возгонки). Качественные и количественные изменения приводят к возрастанию концентрации твердой фазы, уменьшению средних расстояний между частицами, уплотнению и упрочению структуры, т. е. к консолидации твердеющего вещества.

Отвердевшие матричные вещества, т. е. перешедшие в камневидное состояние, например в цементный камень, гипсовый камень, асфальтовое вяжущее вещество, наполненный полимер, цементы высоких температур — керамику, стекло, шлаки, каменное литье и др., занимают определенную часть структуры в соответствующих искусственных конгломератах, выполняя в них функцию цементирующей связки. Крупнозернистая или иного характера минеральная или органическая смесь, составляющая гораздо большую часть объема ИСК и выполняющая в нем функцию заполнителя, скрепляется, цементируется, образуя с вяжущей частью, как матрицей, единый монолит. Небольшая доля вяжущего вещества непосредственно примыкает к поверхности крупных и мелких зерен заполнителя, образуя тонкий контактный слой, именуемый адсорбционно-сольватной оболочкой. Она обладает повышенной плотностью и твердостью по сравнению с остальной (объемной) матричной частью. Контактный слой составляет в структуре ИСК непрерывную пространственную сетку вяжущего вещества, или матрицу конгломерата. Более подробно об образовавшихся структурах в результате отвердевания отформованных и уплотненных изделий и деталей излагается в следующей главе. В заключение общей теории отвердевания следует отметить, что на практике разработана принудительная технология диспергирования, включающая механо-химическую обработку исходной смеси. Меньшее технологическое искусство проявилось пока по реализации второй

стадии отвердевания — конденсации и консолидации твердеющих систем, хотя с этой целью используют химические, тепловые, тепловлажностные, автоклавные, поризующие и другие способы.

2.3. СТРУКТУРА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Под структурой, или внутренним строением строительных материалов, как и других физических тел, понимают пространственное расположение частиц разной степени дисперсности, находящихся в устойчивых взаимных связях (первичных или вторичных) с определенным порядком сцепления их между собой. В понятие структуры входят, кроме того, размер и расположение пор, капилляров, поверхностей раздела фаз, микротрещин и других элементов. В структуре ИСК имеются микродисперсная и макродисперсная части. Под микроструктурой подразумевается расположение, взаимоотношение и взаимосвязь различных или одинаковых по размеру атомов, ионов и молекул, из совокупности которых слагаются вещества в определенных агрегатных состояниях: Сформировавшееся атомно-молекулярное строение, находящееся в относительно устойчивом равновесии, предопределяет макроскопические особенности материала. На макроскопическом уровне также устанавливается в той или иной мере устойчивое расположение, взаимосвязь и порядок сцепления макромолекул, мицелл, кристаллов, кристаллических обломков и сростков, аморфных и других сравнительно крупных частиц и элементов, составляющих материалы, а также соотношения компонентов, фаз и поверхностей раздела более сложной материальной системы — конгломерата (композиционного материала).

Основной формой расположения микрочастиц в пространстве является кристаллическая решетка. Каждому типу связи соответствует свой характерный тип кристаллической решетки, а именно: ионная решетка; молекулярная, или поляризационная решетка, формирующаяся с помощью сил Ван-дер-Ваальса; атомная с резко выраженной ковалентной связью; металлическая; решетка с водородными связями. Особенностью твердых тел является взаимозависимость, или корреляция, положений соседних атомов с ближним и дальним порядками. В кристаллических решетках дальний порядок распространяется на большие области, а ближний — на окружение данного атома. В реальных условиях у кристаллов обычно имеются отклонения от идеальной геометрической формы вследствие ряда побочных явлений в процессах отвердевания.

Твердые вещества, не обладающие кристаллической структурой, относятся к аморфным. Самый распространенный представитель аморфных тел — стекло. Беспорядочное расположение атомов и молекул в аморфных телах усложняет их структуру. О ней нередко судят по некоторым косвенным показателям. Так, например, аморфные вещества при нагревании, в отличие от кристаллических, способны плавиться постепенно, не имея определенной температуры плавления; они обладают изотропностью, т. е. одинаковыми свойствами во всех направлениях. Упорядоченность расположения частиц наблюдается только в небольших элементах объема (ближний порядок). В этих зонах структура именуется как кристаллитная: между кристаллами, занимающими микрообъемы, находятся прослойки полностью аморфного вещества.

У кристаллических твердых тел имеются весьма значимые их признаки: фиксированная температура плавления — полного перехода в жидкое состояние; определенная геометрическая форма кристаллов, которая остается характерной для данного вещества; анизотропия, выраженная в неодинаковых свойствах по различным направлениям. Тепловой эффект кристаллизации — основной критерий этого фазового превращения.

Кристаллическое и аморфное строения могут быть присущи одному и тому же веществу, например кристаллический кварц (кristобалит) и кварцевое стекло имеют общий химический состав SiO_2 . Одно и то же кристаллическое вещество может находиться в различных формах (модификациях) существования кристаллов, что известно под названием полиморфизма. Полиморфизм вызывает изменение свойств при сохранении постоянным состава вещества, что лишний раз указывает на важнейшую роль структур в становлении качества материала. Так, например, алмаз и графит, являясь кристаллическими модификациями углерода, обладают различной твердостью: алмаз применяют при бурении прочных горных пород, графит — мягок и используется как

смазка или стержень карандаша. Другой пример — кристаллические модификации железа, получающиеся при его нагревании и охлаждении: при высокотемпературной форме кристаллов железо способно сравнительно много растворять углерода, тогда как при низкотемпературной — углерод практически не растворим, а при охлаждении железа из растворенного состояния углерод переходит в механическую примесь. При модификации кристаллических тел изменяются и другие свойства.

Структура не остается неизменной, «застывшей». Она непрерывно претерпевает изменения в пространстве и во времени. Этому способствует, в частности, постоянное движение элементарных частиц, взаимодействие материала с окружающей средой, переход вещества из одного состояния в другое под влиянием перераспределения связей между атомами в молекулах, изменения в структуре молекул и других химических форм движения элементарных частиц. Относительная стабильность структуры и внешней формы макроскопических тел обусловлена определенными связями и отношениями структурных элементов, а формы изменений и переходов их состояний проявляются в неизбежных тепловых, тепломассообменных явлениях, процессах кристаллизации и т. п.

Микроструктура и кинетика ее изменения изучаются с помощью оптических методов, электронной микроскопии, дифференциально-термического анализа, рентгенографии и др. Сравнительно простым измерением, производимым на плоскости наблюдения, устанавливается расчетным путем содержание некоторого ключевого элемента структуры в объеме материала¹.

В зависимости от характера связей контактируемых частиц однородные микроструктуры делятся на коагуляционные, конденсационные и кристаллизационные.

Коагуляционными называют структуры, в образовании которых участвуют сравнительно слабые силы молекулярного взаимодействия между частицами — ван-дер-ваальсовы силы сцепления, действующие через прослойки жидкой среды.

Конденсационными называют структуры, возникающие при непосредственном взаимодействии частиц или под влиянием химических соединений в соответствии с валентностью контактирующих атомов или под влиянием ионных и ковалентных связей.

Кристаллизационными (или кристаллическими) называют структуры, образовавшиеся путем выкристаллизовывания твердой фазы из расплава или раствора и последующего прямого срастания отдельных кристаллов в прочный их агрегат, в том числе под влиянием химических связей.

Академик П.А. Ребиндер, разделивший микроструктуры на эти три разновидности, отмечал возможным, и даже более типичным образование смешанных структур как совокупности двух или трех однородных, например кристаллизационно-коагуляционной и др. При определенных условиях возможен самопроизвольный (спонтанный) переход с различной скоростью коагуляционной структуры в конденсационно-кристаллизационную и др. С реальным характером микроструктур связаны в известной мере представления об их качественных характеристиках. Так, например, при коагуляционных структурах почти всегда наблюдается пониженная прочность вещества, способность к тиксотропному восстановлению структуры, разрушенной под влиянием механического воздействия, например вибрирования. Конденсационные и, особенно, кристаллизационные структуры придают веществу повышенную прочность, но вместе с тем и усиливают хрупкость, снижают тиксотропность. Некоторые модификации кристаллов одного вещества могут иметь низкую (например, графит) и очень высокую (например, алмаз) твердость и прочность.

Микроструктура в ИСК распространяется на вяжущую часть. Для придания вяжущему веществу необходимого качества вводят дополнительные активные компоненты — добавки. Размеры их частиц соизмеримы с размерами частиц исходных вяжущих веществ

¹ Обоснованным выбором элементов структуры и количественной оценкой их содержания в структуре занимается специальная наука — стереология.

и возникающих новообразований, поэтому они являются элементом микроструктуры ИСК.

Иногда весьма значительный объем в микроструктуре занимают поры — замкнутые и сообщающиеся, или те и другие одновременно различного происхождения, что зависит от разновидности цементирующего вещества. Поры бывают мелкими, например до $(1—2) \cdot 10^{-7}$ см, как правило, замкнутыми, возникшими в результате усадочных явлений; более крупными после, например, испарения капиллярной влаги (капиллярные поры) с размером в поперечнике до $5 \cdot 10^{-3}$ см, открытыми или сообщающимися между собой; еще более крупными (макропоры), условно принимаемыми сферической формы, размером от 50—100 мкм до 2—5 мм. Количество крупных пор зависит от того, как они возникли в вяжущем веществе: произвольно или преднамеренно. При произвольном вовлечении воздуха в период приготовления смеси их количество обычно невелико (2—5%). Если они возникают под влиянием специально вводимых воздухововлекающих или порообразующих добавок, то в поризованном вяжущем веществе может сосредотачиваться до 50% и более по объему сферических (ячейковых) пор, чаще всего замкнутых.

В микроструктурах могут встречаться другие виды неплотностей. Их относят обычно к дефектам микроструктуры, которые отрицательно влияют на качество материала. Среди них: дефекты кристаллической решетки в виде так называемых вакансий, вызванных «испарением» атома из узла решетки, или в виде дислоцированных атомов, т. е. перемещенных в междоузлии кристаллической решетки, или в виде примесей в кристаллической решетке с значительным искажением качества вещества по сравнению с чистыми и сверхчистыми веществами. Особо опасными являются дефекты в виде микротрещин, способных под нагрузками расти и переходить в макротрещину или магистральную трещину, схватывающую макрообъемы кристаллических агрегатов и тел. Кроме вяжущего вещества, микродисперсной структурой обладают также приповерхностные слои или контактные зоны в материале, отделяющие вяжущее вещество от поверхности другого компонента, например зерен заполнителя, фазы друг от друга. Состав и структура тонких контактных слоев (моно- и полимолекулярных) отличаются от основного вяжущего вещества. Отличается от других объемов материала и качество этих слоев, так как оно зависит от пограничных дефектов структуры, прочности сцепления контактируемых веществ и пр. Различие в качестве приповерхностного слоя и остального объема вяжущего не является скачкообразным, а довольно плавным. .

«Укладка» микрочастиц происходит компактно, по известному физико-химическому принципу наиболее плотной упаковки. Этот принцип характеризуется тем, что при укладке атомов, ионов или молекул в кристалле возникает наименьшее остаточное, свободное пространство. Однако такой принцип применим не ко всем видам кристаллов, так как при плотной упаковке может возникнуть меньшая устойчивость равновесия, которая зависит от направления валентностей контактируемых частиц.

Макроструктура ИСК различима невооруженным глазом. Она образована под влиянием цементирующей способности вяжущего вещества, благодаря чему полизернистые или иной формы частицы заполнителя — волокнистые, пластинчатые, угловатые, шарообразные и т. п. — скрепляются между собой в общий монолит. В макроструктуре содержится также капиллярно-поровая часть, причем макродисперсные поры и капилляры в ячеистых бетонах в виде замкнутых ячеек, заполненных газовой или воздушной средой, являются как бы своеобразной разновидностью заполнителя.

Подобно компактной упаковке дискретных частичек в микроструктуре вяжущих веществ смесь грубозернистых заполнителей подбирают с наименьшим объемом межзерновых пустот, что позволяет экономить на расходе связующих веществ, как наиболее дорогостоящих компонентов, и уменьшать усредненную толщину континуального слоя вяжущего вещества в конгломерате.

С этой целью зернистые заполнители предварительно разделяют на фракции по размерам, а затем опытным или расчетным путем находят содержание каждой фракции в плотной смеси заполнителя ИСК, которые следуют либо непрерывно друг за другом и с получением, следовательно, непрерывного гранулометрического состава, либо с исключением некоторых фракций и с получением прерывистого гранулометрического состава смеси. Своеобразный метод подбора гранулометрического состава плотной смеси, пригодный для заполнителей безобжиговых и обжиговых ИСК, предложен П.И. Боженковым. В основе этого метода лежит прерывистая гранулометрия. Им установлено, что соотношение размеров зерен двух любых смежных фракций заполнителя в идеальном случае (при шарообразной форме зерен) равно:

$$d_{i+1}/d_i = 0,226, (2.8)$$

где d_i — средний диаметр зерен любой i -той фракции, мм; d_{i+1} — средний диаметр зерен смежной фракции, мм.

Количество наибольшей по крупности зерен фракции P_l , входящей в заполнитель, численно равно ее средней плотности в уплотненном состоянии: $P_l = \gamma_{об1} \cdot V$, где $\gamma_{об1}$ — средняя плотность, кг/м³; V — объем фракции, м³.

Количество всех фракций, следующих за наиболее крупной (для размещения в том же объеме V), определяют по формуле:

$$P_i = (\gamma - \gamma_{об1}) (1 - \varphi_2) (1 - \varphi_3), \dots, (1 - \varphi).$$

Здесь P_i — масса i -той фракции, кг; γ — плотность материала, кг/м³; $\varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_i$ — коэффициенты заполнения объема межзерновых пустот¹.

Имеются и другие формулы для расчета количества фракции $y(\%)$, проходящей через сито с ячейками размером d_i (мм) при размере самой крупной фракции смеси D (мм). Так, по формуле Андреасена $y = (d_i/D)^{0.5} \cdot 100$; например, для фракции $d_i = (0,2—0,1)$ мм и при $D = 3$ мм $y = (0,15/3,00)^{0.5} \cdot 100 = 22\%$. Для огнеупорных материалов [49] плотная упаковка достигается при использовании формулы: $y = [\alpha + (1 - \alpha) (d_i/D)^n] \cdot 100 (\%)$, где α — коэффициент, зависящий от свойств массы и содержания в ней тонкомолотого компонента (находится в пределах $0 < \alpha < 0,4$); n — показатель степени, характеризующий распределение узких фракций внутри грубозернистой и тонкозернистой составляющих в смеси, равный 0,5—0,9. Так, например, если $D = 3,0$ мм, $d_i = 0,06$ мм, а коэффициент $\alpha = 0,31$, то $y = 0,31 \cdot (1 - 0,3) \cdot (0,6/3,00)^{0.5} = 42\%$. Оптимальное значение величин α и n при заданном D находят опытным путем.

Если крупные частицы, например щебня и гравия, сближены в такой мере, что контактируют непосредственно друг с другом или через тонкие прослойки вяжущего вещества, то сформировавшаяся структура называется контактной. Если частицы разделены прослойками вяжущего

вещества значительной усредненной толщины, то макроструктуру принято именовать порфировой. В первом приближении оценить вид структуры можно по коэффициенту упаковки. Под коэффициентом упаковки K_y понимают величину, получаемую делением размера проекции расстояния (рис. 2.11) между соседними крупными зернами (частицами) на плоскость к их диаметрам: $K_y = (l - d)/d$, где l — проекция расстояния между центрами соседних зерен (частиц); d — диаметр частиц (зерен), для которых вычисляется этот коэффициент, а если частицы (зерна) имеют разный диаметр, то $d = r_1 + r_2$, где r_1 и r_2 — радиусы соседних частиц (зерен). Положительные значения коэффициента упаковки характеризуют порфировую структуру, а отрицательные — контактную структуру. При K_y

¹ Баженков П.И. Улучшение качества конгломератных материалов фракционированием заполнителя // Строительные материалы. 1978, 9.

= 0 наблюдается соприкосновение частиц друг с другом без зацепления, т. е. без захода их одна за другую.

При максимальной плотной упаковке частиц шарообразной формы и одного диаметра с количеством их 74% по объему коэффициент упаковки равен -0,1. Увеличение количества частиц в конгломерате (например, щебня) приводит к дальнейшему увеличению отрицательной величины коэффициента упаковки, т. е. к большему зацеплению или заходу щебенки друг за друга, что характеризует законтактную структуру. Но на величину коэффициента упаковки влияет не только количество, но и размер крупнообломочных частиц. Чем крупнее зерна, тем меньшее количество щебня требуется для того, чтобы коэффициент упаковки оказался отрицательной величиной.

При оценке характера структуры вместо коэффициента упаковки можно пользоваться числовой величиной отношения объема заполняющей части к объему конгломерата. При отношениях, близких к единице, структура является контактной.

Кроме заполнителя в смесь нередко добавляется порошкообразный материал, частицы которого соизмеримы с размерами частиц используемого в ИСК вяжущего вещества и новообразованиями -кристаллическими, аморфными, кристаллитными и др. Их называют наполнителями.

Заполнители и наполнители могут быть активными, неактивными или малоактивными. К активным принадлежат те, которые при добавлении к вяжущему веществу повышают прочность ИСК оптимальной структуры хотя бы по одному виду напряжений — сжатию, растяжению, сдвигу и т. п.

Упрочнение вяжущего вещества при использовании активного заполнителя (наполнителя) происходит под влиянием дополнительных физико-химических или химических взаимодействий контактируемых веществ или вследствие армирующего эффекта (например, при волокнистых разновидностях заполнителя или наполнителя).

Неактивные или малоактивные разновидности заполнителей и наполнителей не только не способствуют упрочнению оптимальной структуры ИСК по мере увеличения их содержания, но и снижают прочностные характеристики. Степенью активности этих компонентов конгломератной смеси возможно управлять с помощью твердых или жидких активизаторов и ПАВ, обогащением, дроблением округлых (например, гравийных, галечных) зерен, минерализацией (например, при использовании органических заполнителей в сочетании с неорганическими вяжущими веществами), промывкой, рифлением, распушкой и т. п. на стадиях подготовительных работ принятого технологического процесса. Ниже (см. гл. 3) приведена формула прочности ИСК оптимальной структуры, в которой числовое значение степенного показателя n достаточно полно отражает качественную характеристику заполнителя и размеры изменения прочностных показателей конгломератов под влиянием используемых способов активизации и уплотнения смеси. Одна из важных технологических задач на производстве — всемерное снижение числового показателя n .

Из изложенного следует, что все ИСК обладают микро- и макроструктурами. Иногда еще при необходимости условно выделяется мезоструктура, т. е. промежуточная по дисперсности частиц между микро- и макрочастицами. Само собой разумеется, что такое подразделение монолитной структуры ИСК является чисто условным. В реальных условиях выделить такие структурные элементы без разрушения монолитности всей системы нельзя. Структура ИСК, тем более оптимальная, составляет единую, неделимую, цельную систему. Однако мысленное выделение отдельных ее частей из монолитной структуры имеет большое методологическое значение, так как позволяет с некоторым приближением моделировать расчетные реологические схемы, соответствующие им математические формулы по определению качественных показателей, которые зависят от физических характеристик упомянутых основных структурных элементов. На технологической стадии изготовления ИСК условное разделение структуры на две-три части может быть использовано и для практических целей, например при выполнении

операций так называемой раздельной технологии, когда приготовленную вяжущую часть определенного состава соединяют с помощью совместного перемешивания с подготовленной отдельно заполняющей частью¹. Однако, независимо от последовательности чередования операций в технологический период с учетом всех их позитивных и негативных особенностей, сформировавшаяся структура после отвердевания вяжущего элемента и ИСК в целом становится монолитной, единой и неделимой.

Неоднократно проводившиеся исследования показали, что при селективном (выборочном) растворении микро- и макроструктурных частей конгломерат либо полностью разрушался, либо почти полностью терял свои качественные показатели. Поэтому иногда используемое выражение для характеристики конгломерата (композиционного материала) как «структура в структуре» можно относить только к комбинированным системам, упомянутым в классификации ИСК (см. рис. 1.1); к ним принадлежат изготовленные ИСК, пропитанные на последующей стадии технологии еще и другим вяжущим веществом с заполнением полостей и образованием второй непрерывной пространственной сетки вяжущего вещества, например в цементополимербетонах. Образуются две взаимосвязанные структуры, которые возможно не только мысленно, но и практически отделить друг от друга, хотя, естественно, с некоторым ухудшением качества комбинированного конгломерата.

Единая и монолитная структура конгломерата может быть оптимальной и неоптимальной. *Оптимальная* структура характеризуется: равномерным распределением по объему заполнителя, фаз, компонентов, пор и других составляющих ее элементов; отсутствием или минимальным содержанием дефектов как концентраторов напряжений или аккумуляторов агрессивной среды; наличием непрерывной пространственной сетки, или матрицы, из вяжущего вещества; минимальным значением отношения массы среды к массе твердой фазы, именуемого условно как фазовое отношение; наибольшей плотностью упаковки твердых частиц как в микро-, так и в макроструктурных частях. Если в материале отсутствуют вяжущие прослойки, то одним из условий оптимальности структуры служит наибольшая поверхность контактирования и взаимосвязи твердых частиц или ее уменьшение, если химические связи, например ван-дер-ваальсовы, не обеспечивают эффективного упрочнения контактов.

Не всегда изделие обладает одинаковой оптимальной структурой во всех своих деталях, например поверхностный слой может отличаться от его внутренней части. Однако оптимальная структура всегда является отражением принятых технологических особенностей формирования ее в производственных условиях.

Неоптимальными называют структуры, которые не удовлетворяют хотя бы одному из вышеуказанных обязательных условий оптимальности.

При одинаковой технологии изготовления смеси и изделия, других одинаковых условиях можно получить неограниченное количество неоптимальных структур, гораздо меньше — оптимальных и одну-две — рациональных. К последним относятся оптимальные структуры, при которых конгломерат в полной мере соответствует заданным и притом экстремальным показателям качества, а также реальным параметрам производства. При проектировании важно остановиться на составе, при котором структура, сформировавшаяся при данной технологии и при принятых режимах, является не только оптимальной, но и рациональной.

Оптимальным структурам соответствуют улучшенные показатели качества материалов по сравнению с неоптимальными структурами. Это улучшенное качество обусловлено повышенной плотностью, минимальным количеством жидкой среды, повышенной концентрацией твердой, например кристаллической, фазы, минимумом объема пор в

¹ Раздельная технология в 1920-х годах была впервые предложена д.т.н., проф. П.В. Сахаровым применительно к производству асфальтобетона.

контактных зонах и рядом других причин, особенно энергетического характера. При оптимальных структурах свободная энергия Гиббса и свободная энергия Гельмгольца становятся минимальными, так как переходят в более эффективные формы связи.

В теории ИСК разработан, а в практике используется общий метод проектирования оптимальных составов и оптимальных структур различных безобжиговых и обжиговых материалов (см. гл. 3). С его помощью получают из принятых компонентов материал, удовлетворяющий заданным техническим требованиям при оптимальной структуре, т. е. экстремальным показателям качества.

Достоинство оптимальных структур заключается также в подобии их между собой, что означает, в частности, принципиальную общность закономерности, вскрываемой в отношении какого-либо одного материала. О подобии материалов оптимальной структуры изложено в 3.3.

В настоящее время уточняются нормативные параметры оптимальных структур и технических свойств взамен устаревших стандартов¹.

¹ Рыбьев И.А. Типизация параметров взамен устаревших стандартов. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, № 5, 2003.

Теория прочности, деформативности и конгруэнции свойств

3.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

При выборе материала и обосновании целесообразности применения в строительной конструкции учитывают его способность сопротивляться реальным нагрузкам без нарушения сплошности и размеров. Одни материалы успешно сопротивляются сжимающим усилиям, другие — растягивающим, которые возникают под действием нагрузки или других силовых факторов. Аналогичная сопротивляемость материалов характерна при воздействии сил, способных вызвать изгиб, сдвиг, раскалывание и т. п. Материал должен надежно сопротивляться этим воздействующим силам при работе конструкции в эксплуатационный период.

Одновременно необходимо, чтобы материал проявлял достаточную стойкость к воздействию физических (например, температуры и ее колебаний, в особенности при переходе через 0°C , водной среды и др.) и химических (кислоты, щелочи, солевые растворы и др.) факторов. Нередко одним из главных показателей качества служит способность материала к восприятию технологической обработки, например шлифования, распиливания, раскалывания на части правильной формы и т. п. Следовательно, для обоснованного выбора материала приходится учитывать комплекс его так называемых свойств. Под свойствами строительных материалов понимают их способность определенным образом реагировать на отдельные или совокупные внешние или внутренние воздействия — силовые, тепловые, усадочные, водной или иной среды и т. д.

Свойства разделяют на четыре группы: механические, физические, химические, технологические, иногда выделяют еще физико-химические. В совокупности все свойства именуют как технические свойства строительных материалов. Числовые значения свойств получают при лабораторных или полевых испытаниях материалов с помощью соответствующих приборов и аппаратов. Испытания производят с разрушением специально подготовленных образцов или отдельных элементов конструкции или без их разрушения, т. е. адеструктивными методами.

3.1.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Механические свойства выражают способность материала сопротивляться напряжениям силовым (от механических нагрузок), тепловым, усадочным или другим без нарушения установившейся структуры. Чаще всего напряжение обусловлено внутренней механической силой, а его числовая величина определяется как отношение силы к единице площади. Под внутренней подразумевают силу действия частиц, находящихся по одну сторону площадки, на частицы, находящиеся по другую сторону этой площадки (рис. 3.1). Расчетom определяют нормальные (перпендикулярные к площадке) и касательные напряжения, выражаемые в размерности «сила/площадь» (МПа).

Механические свойства разделяются на деформационные и прочностные.

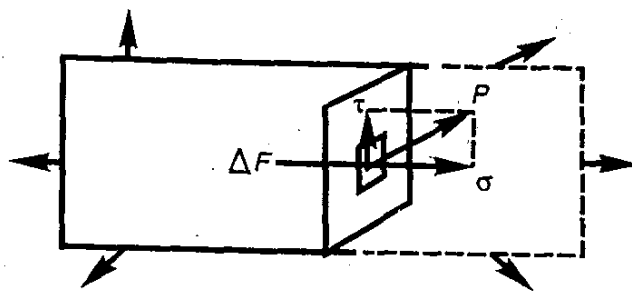


Рис. 3.1. Схема расположения сил при напряжениях

Деформационные свойства характеризуют способность материала к изменению формы или размеров без отклонений в величине его массы. Главнейшие виды деформаций — растяжение, сжатие, сдвиг, кручение и изгиб. Все они могут быть обратимыми и необратимыми. Обратимые полностью исчезают при прекращении действия на материал факторов, их вызвавших. Необратимые деформации, или остаточные, называемые также пластическими, накапливаются в период действия этих факторов; после их снятия деформации сохраняются. Обратимые деформации, исчезающие мгновенно и полностью, называются упругими; исчезающие в течение некоторого времени — эластическими. Деформации могут быть также сложными — упруго-пластическими или упруго-вязко-пластическими, если достаточно четко выражены соответственно упругая и пластическая или упругая, эластическая и пластическая части (рис. 3.2).

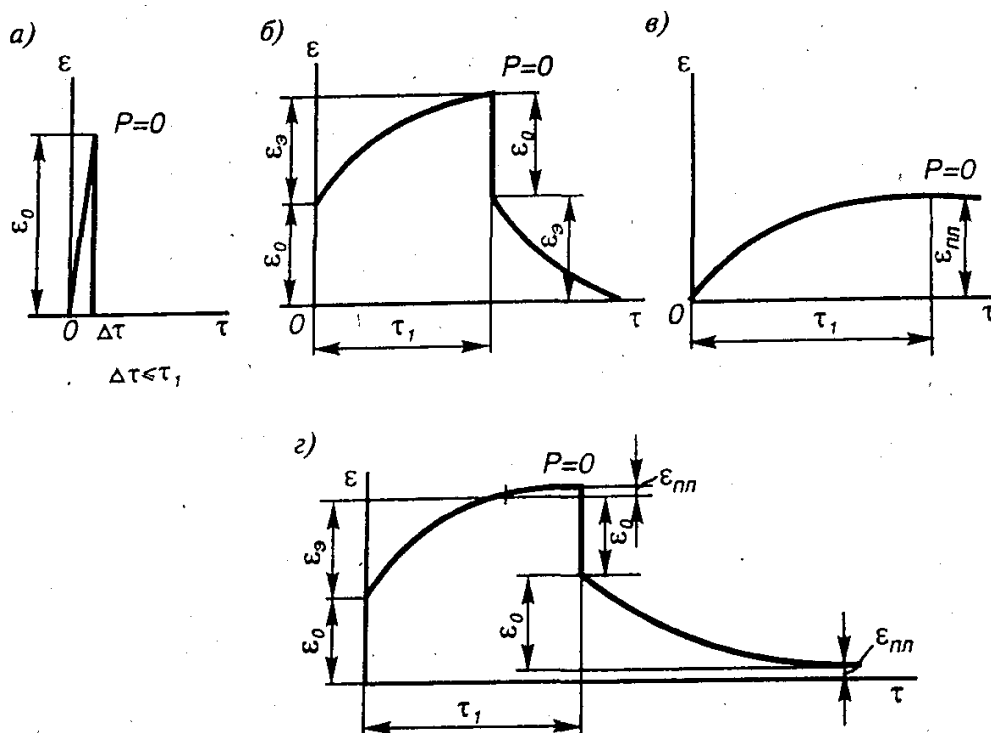


Рис. 3.2. Графики зависимости деформаций (ϵ) от времени (τ) действия нагрузок: а — упругая деформация; б — упругоэластическая деформация; в — пластическая деформация; г — упругопластическая деформация

На характер и величину деформации влияют не только величина механического нагружения, но и скорость приложения этой нагрузки, а также температура материала. Как правило, с повышением скорости нагружения, а следовательно, деформирования, а также с понижением температуры материала деформации по своему характеру

приближаются к упругим и упруго-пластическим, уменьшаясь по своей абсолютной величине.

Пластические деформации, медленно нарастающие без увеличения напряжения, характеризуют текучесть материала. Пластическая деформация, медленно нарастающая в течение длительного времени под влиянием силовых факторов, не способных вызвать остаточную деформацию за обычные периоды наблюдений, называется деформацией ползучести, а процесс такого деформирования — ползучестью, или крипом.

Явление ползучести выражается в непрекращающемся изменении размера тела (образца) под влиянием 'растягивающих или сжимающих силовых воздействий (напряжений ниже предела прочности) при постоянной температуре (ниже температуры плавления). Ее обычно выражают в единицах скорости деформации, т. е. как относительное изменение размеров образца (в мм) за время (в ч): $\dot{\epsilon} = (\Delta l / l) \cdot (1 / \tau)$, где Δl — линейное изменение образца, мм, за время τ , ч; l — начальная длина, мм.

Деформационные свойства строительных материалов, как и других тел, обуславливаются периодом, или временем релаксации. Релаксацией называется процесс самопроизвольного падения внутренних напряжений в материале, связанных с молекулярным перемещением при условии, что начальная величина деформации остается неизменной, например зафиксированной жесткими связями. Характер начальной деформации в период релаксации напряжений может измениться, например, из упругой постепенно перейти в необратимую (пластическую), что связано с переориентацией внутримолекулярной структуры. Время, или период, релаксации определяет продолжительность релаксационных процессов, в результате которых первоначальная величина напряжений при строго зафиксированной деформации снизилась в e раз (e — основание неперовых логарифмов, равное 2,718...). Так, например, если у материала в виде образца напряжение было равно 5,0 МПа, а возникшая деформация под влиянием этого напряжения была жестко зафиксирована, то время (θ с), за которое напряжение самопроизвольно снизилось до величины $5,0 : 2,718 = 1,85$ МПа, называется временем, или периодом, релаксации, выражаемым в секундах или минутах. Эта величина — важная характеристика строительных материалов: чем она меньше, тем более деформативным является материал. Нередко время релаксации зависит от температуры материалов в момент испытания и скорости приложения нагрузки, являясь непостоянной величиной.

При весьма малой продолжительности (τ с) действия сил (или кратковременном наблюдении) по сравнению с величиной времени релаксации ($\tau \ll \theta$) все материалы (тела) ведут себя как упругохрупкие тела и имеют полную обратимость деформаций, если, конечно, напряжения не нарушают их сплошности. Однако наиболее типичным случаем деформации хрупких тел (материалов) является отсутствие структурных изменений, а упругая энергия, затрачиваемая на деформацию, не успевает рассеиваться под влиянием релаксационных процессов. У упругохрупких тел возможно накопление малой упругой энергии, а за счет местных разрушений структуры происходит частичная релаксация напряжений. Приближенным значением меры хрупкости служит $\psi = \epsilon_y / \epsilon_{пред}$ и при $\psi = 1$ — 0,8 разрушение от нагружения происходит без торможения трещин, внезапно.

При очень длительных ($\tau \gg \theta$) наблюдениях за действием нагрузки (по сравнению с временем релаксации) материал подобно жидкости течет. При очень коротких наблюдениях (по сравнению с временем релаксации) даже жидкий материал проявляет хрупкость твердого кристаллического тела. Так, например, при весьма коротком времени действия силы на воду, время релаксации которой равно порядка 10^{-11} с, она ведет себя как кристаллическое твердое тело; при весьма длительном периоде действия сил (или наблюдения) природный камень в виде горных пород, время релаксации которого равно 10^{10} с, ведет себя как текучая жидкость. Но эти крайние условия не встречаются в практике строительства и эксплуатации конструкций зданий и сооружений, поэтому вода всегда кажется жидкой, а камень — твердым. Однако многие материалы остаются весьма чувствительными к различию между временем действия нагрузки и временем релаксации,

особенно при повышенных температурах, когда процесс релаксации напряжений в некоторых материалах заметно интенсифицируется, особенно при местных (локальных) перенапряжениях в материале.

Кроме времени релаксации, в расчетах пользуются коэффициентом ψ релаксации, показывающим долю спада напряжений за определенный период времени: $\psi = \sigma_\tau / \sigma_0$, где σ_τ — напряжение в момент времени τ при постоянной деформации; σ_0 — начальное напряжение.

Коэффициент релаксации позволяет расчетным путем определить релаксационную характеристику с помощью опытных значений деформации ползучести, точнее — скорости ползучести, получаемых менее трудоемким измерением, чем релаксации напряжений. С некоторым приближением к опытным данным можно воспользоваться зависимостью: $\ln \psi = -\varphi$, где φ — коэффициент ползучести, равный $\varepsilon_\tau / \varepsilon_0 = E_0 / \varepsilon_S$; ε_τ — деформация ползучести в момент времени τ при постоянном напряжении σ_0 ; ε_0 — начальная упругая деформация, равная σ_0 / E_0 ; E_0 — начальный модуль упругости, равный σ_0 / ε_0 ; ε_S — удельная деформация ползучести в момент времени τ , равная $\varepsilon_\tau / \sigma_0$.

Прочность характеризует способность материала в определенных условиях и пределах, не разрушаясь, сопротивляться внутренним напряжениям и деформациям, возникающим под влиянием механических, тепловых и других напряжений.

Типичными прочностными характеристиками служат предел упругости, предел текучести и предел прочности при воздействии

сжимающих, растягивающих или других видов усилий. Пределу упругости соответствует напряжение материала при максимальной величине упругой деформации; пределу текучести — постоянное напряжение при нарастании пластической деформации; пределу прочности — максимальное напряжение в момент разрушения материала (рис. 3.3). Эти характеристики прочности относятся к кратковременному действию приложенной нагрузки (табл. 3.1). При длительном действии нагрузки возрастает опасность нарушения структуры материала. Даже сравнительно малые величины напряжения (например, от собственной массы) могут вызвать ползучесть и заметное ухудшение структуры с потерей прочности. Нередко измеряют длительную прочность материала не только при статической (неподвижной), но и динамической нагрузках. Материал может резко терять свою прочность после приложения к нему вибрационной нагрузки, что обусловлено усталостью — накоплением неотрелаксированных напряжений и необратимых микродефектов в структуре. Соответствующая прочность материала называется усталостной и определяется специальным испытанием образцов.

Таблица 3.1. Физико-механические свойства некоторых материалов

Наименование материала	Предел прочности при сжатии, МПа	Истинная плотность, кг/м ³	Средняя плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·°С)
Гранит	150—250	2600—2800	2500—2700	2,9—3,3
Известняк плотный	50—150	2400—2600	1800—2200	0,8—1,0
Известняк-ракушечник	0,5—5	2300—2400	900—1400	0,3—0,6
Кирпич керамический	10—20	2600—2700	1700—2000	0,8—0,9
Кирпич силикатный	10—20	2400—2550	1700—1900	—
Бетон тяжелый	10—60	2500—2600	1800—2500	1,1—1,6
Бетон легкий	2—15	—	500—1800	0,35—0,8
Древесина сосновая	30—60	1550—1600	500—600	0,15—0,2
Сталь Ст.3 (при растя-жен.)	380—450	7800—7900	7800—7900	58
Пластмассы	120—200	1000—2200	100—1200	0,23—0,80
Портландцемент, кг/см ² (марка)	300—600	3000—3200	Насыпная плотность 1200—1300	—

В целом упомянутые выше характеристики прочности по своей сущности относятся к условным по двум причинам. Во-первых, они не учитывают фактора времени, что с некоторым приближением можно допустить только в отношении хрупких материалов. Во-вторых, приборы, размеры и форма образцов, скорость приложения нагрузки на прессе и другие исходные параметры методов испытания материала на прочность приняты условными. Поэтому материал может иметь различную величину показателя прочности в зависимости от размера образца, скорости приложения нагрузки и конструкции прибора, на котором испытывались образцы. Например, чем меньше размеры «кубика», больше скорость приложения нагрузки (или скорости деформации), тем выше получаемая величина предела прочности при испытании на сжатие.

В упругой области деформаций действует закон Гука: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, где σ — напряжение, МПа; ε — относительная упругая деформация; E — модуль упругости материала, МПа. Если относительная деформация ε , выражающая отношение прироста деформации Δl к первоначальной длине образца l , т. е. $\Delta l / l$ окажется равным единице ($\varepsilon = 1$), то $E = \sigma$. Отсюда следует, что модуль упругости по своему физическому смыслу численно равен напряжению, которое потребовалось приложить к материалу (образцу), чтобы вызвать относительную деформацию $\varepsilon = 1$ (что возможно, когда приращение $\Delta l = l$), т. е. когда было удвоение длины образца при условии сохранности упругих свойств материала. В реальных строительных материалах (кроме резины) величина упругой деформации всегда гораздо меньше, составляя у стали 1—1,5 %, а у хрупких она и вовсе приближается к нулю.

Численные значения величины модуля упругости и прочности определяют как с разрушением образцов, например при испытании под прессом, так и неразрушающими (адеструктивными) методами. Распространены следующие адеструктивные методы их измерения: акустические, магнитные и электромагнитные, механические, радиометрические, рентгеновские и электрические. Они основаны на прямых и обратных закономерностях между физическими значениями, получаемыми при испытании неразрушающим прибором, и традиционными показателями свойств. Зависимости выражаются в виде формул, таблиц, тарифовочных графиков. Измерения становятся более эффективными при комплексном использовании адеструктивных методов измерения с получением двух или нескольких физических характеристик.

К комплексным методам относится совместное применение механического и ультразвукового методов или радиометрического и ультразвукового и других для определения предела прочности и модуля упругости, контроля качества и дефектоскопии, однородности по различным показателям (прочности, влажности, толщине защитного слоя и др.). Эти методы весьма эффективны при контроле за сохранением оптимальности структуры материалов и изделий по однородности, минимуму дефектов, плотности, континуальности пространственной сетки вяжущего вещества или жидкостной оболочки свежееизготовленного монолита, минимального количества вяжущего вещества или другим обязательным ее параметрам. В частности, набору параметров оптимальной структуры соответствует наиболее широкий спектр частот ультразвукового сигнала, а также наибольшая амплитудная характеристика.

Альтернативой условным методам определения прочности имеются инвариантные, независимые от обстановки опыта. К инвариантным характеристикам прочности относятся предельное напряжение сдвига (P_k), структурная вязкость и другие, определяемые с помощью построения реологических кривых по данным измерений на вискозиметрах, пластометрах и других приборах. Принцип действия таких приборов основан на истечении массы через капилляр заданного диаметра или на погружении в вещество металлического конуса, шара или других тел. При испытаниях осуществляется чистый и однородный сдвиг частиц вещества относительно друг друга в плоскостных или цилиндрических (коаксиальных) приборах (вискозиметрах) и достаточно четко устанавливается, что прочностные характеристики существенно зависят от продолжительности действия механического усилия, являются типичными кинетическими величинами.

Кроме прочности технической или реальной, определяемой с помощью условных или инвариантных приборов, существует прочность, определяемая вычислением и поэтому называемая теоретической. Простейший метод оценки теоретической прочности твердых тел был, в свое время, предложен Поляки. Так, если для разрыва стержня сечением 1 м^2 потребовалось приложить напряжение сто, а атомные плоскости при этом удалились друг от друга на величину a , адекватную порядку параметра кристаллической решетки, то работа выразилась как $\sigma_0 \cdot a$. При разрыве образовались две новых поверхности площадью 2 м^2 , а затраченная работа перешла в свободную поверхностную энергию. Последнюю можно обозначить как g и выразить в Дж/м^2 . Следовательно, $\sigma_0 \cdot a = 2g$. Отсюда искомая теоретическая прочность $\sigma_0 = 2g/a$.

Существуют и другие методы определения теоретической прочности хрупких твердых тел, например по теплоте сублимации (переходе вещества из твердого состояния в газообразное без превращения в жидкость); по методу Поляни—Орована (из сил молекулярного взаимодействия) и др. Установлено, что независимо от метода вычисления результаты дают близкие значения теоретической прочности для твердых тел: $\sigma_0 \approx 0,1E$. Учитывая высокие значения модуля упругости (табл. 3.2), становится очевидным, что теоретическая прочность твердых тел и кристаллов также очень велика. Что же касается технической (реальной) прочности, то она в 100—1000 раз, т. е. на два-три десятичных порядка, ниже теоретической прочности (см. табл. 3.2). Большое различие между теоретической и реальной прочностью материалов объясняется дефектностью микро-структуры, т. е. наличием микротрещин, пор и т. п. Чем крупнее образцы твердых тел, принятых для испытания, тем больше концентрируется в них дефектов, а поэтому их реальная прочность ниже, т. е. действует обратная зависимость прочности от размера изделий (масштабного фактора).

Таблица 3.2. Свойства некоторых металлических и неметаллических материалов

Вещество	Модуль упругости E , 10^7 Па	Теоретическая прочность σ_0 , 10^7 Па	Техническая прочность σ_n , 10^7 Па	Отношение σ_0/σ_n
----------	--	--	--	-------------------------------

Алюминий катаный	6000	600	9	65
Медь прокатная	12000	1200	23	50
Железоуглеродистая сталь	21000	2100	30	70
Стекло	8000	800	8	100
Дерево вдоль волокон	1100	110	12	9
Полистирол	300	30	3	10

Наиболее обстоятельно метод расчета реальной (технической) прочности хрупких твердых тел исследовал Гриффите. Им предложена формула для расчета этой прочности материала, имеющего микротрещину:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{2g \cdot E}{l}} \approx \beta \sqrt{\frac{g \cdot E}{l}}, (3.1)$$

где g и E — соответственно свободная поверхностная энергия образца и модуль упругости материала, l — длина поперечной микротрещины в образце, составляющая обычно к моменту разрушения образца несколько микрон или более; β — числовой коэффициент, зависящий от вязкости и характера материала: наличия кристаллической и аморфной фаз, их количественного соотношения, дефектов в кристаллической решетке (вакансий, дислокаций), микропор в аморфной части структуры.

Следует отметить, что прочность больше, чем некоторые другие свойства материала, проявляет чувствительность к явлениям и процессам формирования и изменения структуры, особенно кристаллической. Прочность является структурно-чувствительным свойством, поэтому ее можно изменять в необходимом направлении путем соответствующих корректив структуры на микро- или макроуровне; уменьшения дефектов; введения добавок, например кристаллических затравок; повышения дисперсности новообразующихся фаз; оптимизации структуры, изменения пористости и размера пор и др.

Дополнительными характеристиками механических свойств материалов служат твердость, истираемость, ударная вязкость. *Твердость* выражает способность материала сопротивляться проникновению в него более твердых тел, например при испытании на склерометрах путем вдавливания стального шарика или стального конуса, царапанию резцом, сверлению, ударе молотком, пулевым выстреле и пр. Эти испытания дают условные значения твердости либо только качественные, например по следу царапания, либо также и количественные — по глубине или площади отпечатка с учетом приложенной нагрузки. Нередко стремятся перейти от полученного значения твердости к величине прочности. Устанавливаемые отношения между твердостью и прочностью тем менее точны, чем пластичнее материал. Только у хрупких тел царапание можно более или менее надежно сравнивать с прочностью, поскольку оба этих свойства обусловлены в основном сцеплением между микрочастицами материала.

Нередко о твердости судят также по потере массы образцов при истирании на металлических кругах с добавлением абразивных порошков.

Более сложным свойством, включающим прочность и твердость, служит износ. Об износостойкости материала судят по испытанию пробы определенной массы во вращающемся барабане с металлическими шарами или без шаров, в течение определенного периода времени или определенной частоты вращения. Чем больше измельчается проба, тем, следовательно, и больше ее износ (в %).

Ударная вязкость характеризует способность материала сопротивляться сосредоточенным ударным нагрузкам и определяется количеством работы, затрачиваемой на излом образца в фиксированном с помощью насечки месте. Работа, отнесенная к

площади поперечника образца, характеризует единичную ударную работу на излом, называемую удельной ударной вязкостью. Она имеет практическое значение при оценке качества металлов, асбестоцементных изделий, например кровельных листов и плит.

3.1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Строительные материалы обладают комплексом физических свойств, т. е. способностью реагировать на воздействие физических факторов —гравитационных, тепловых, водной среды, акустических, электрических, излучения (ядерного, рентгеновского и др.). Ниже рассмотрены некоторые свойства, методы и приборы для их оценки в числовых показателях.

Средняя плотность характеризует массу единицы объема материала в естественном состоянии (вместе с порами). Эта важная физическая характеристика определяется путем деления массы m образца на его объем V_0 и выражается $\rho_0 = m/V_0$ в г/см³, кг/м³ или кг/дм³. Для точного измерения объема удобнее принимать образцы правильной геометрической формы, хотя имеются несложные приемы измерения объема образцов и неправильной формы. При влажных образцах отмечается величина влажности, при которой определялась средняя плотность.

Среднюю плотность рыхлых материалов, например песка, щебня, гравия, называют насыпной плотностью. В ее величине отражается влияние не только пор в каждом зерне или куске, но и межзерновых пустот в рыхлом насыпанном объеме материала.

Истинная плотность — масса единицы объема однородного материала в абсолютно плотном состоянии, т. е. без учета пор, трещин или других полостей, присущих материалу в его обычном состоянии. Определяется как отношение массы m материала, выраженной в г или кг, к объему V его в абсолютно плотном состоянии: $\rho = m/V$. Размерность истинной плотности г/см³, кг/м³.

Величина ρ , как правило, больше ρ_0 , так как подавляющее количество материалов содержат поры, трещины, каверны.

Пористость — степень заполнения объема материала порами: определяют ее по формуле $\Pi = [(\rho - \rho_0)/\rho]100$ (в %).

Если требуется выяснить, являются ли поры замкнутыми или сквозными, как распределены они в объеме материала по своим размерам, какое имеется реальное соотношение пор разных диаметров, тогда производят дополнительные исследования с применением специальных методов: сорбционного, ртутной порометрии, капиллярного всасывания и др.

Величина пористости и размер пор в значительной мере влияют на прочность материала. При одном и том же веществе строительный материал тем слабее сопротивляется механическим силам, усилиям другого происхождения (тепловым, усадочным и др.), чем больше пор в его объеме. Для некоторых разновидностей материалов существуют ярко выраженные зависимости. Так, например, чем меньше средняя плотность (больше пористость), тем меньше прочность материала. В самом общем виде зависимость прочности от пористости выражена формулой: $R_n = R_0(1 - \Pi)$, где R_n и R_0 —прочности соответственно пористого и беспористого материала; Π — коэффициент структуры, отражающий ее пористость; Π — общая пористость материала (вещества) в долях единицы. Наименьшее значение коэффициента $\Pi = 1,0—1,1$ соответствует оптимальным структурам с содержанием пор Π до 0,02—0,03. Формула показывает возможность приближения значений R_n и R_0 путем изменения структуры материала (вещества).

Известны многочисленные эмпирические формулы, полученные из 13 опытных данных применительно к различным материалам, в той или иной мере воспроизводящие указанную выше зависимость $R_n = f(\Pi)$. Опытные данные показывают, что при увеличении пористости от нуля до 20 % прочность снижается почти линейно. Впрочем возможны и «аномалии», особенно среди обжиговых ИСК, когда прочность повышается с повышением пористости, например при обжиге шпинелидных огнеупоров.

От пористости зависят и другие качественные характеристики, например способность проводить теплоту и звук, поглощать воду. От пор отличаются полости в структуре, именуемые пустотами. Они значительно крупнее пор, отчетливо видны и расположены

между зернами насыпного материала. В отличие от пор вода в пустотах, особенно в широкополостных, не задерживается.

На величину прочности влияют и размеры пор. Она возрастает с уменьшением размера пор. Мелкозернистые материалы и, следовательно, мелкопористые, имеют повышенную прочность по сравнению с крупнозернистыми. При этом в меньшей мере снижают прочность закрытые поры, а не открытые, сквозные, обычно по своей форме остrokонечные. Имеет значение и местоположение пор. В крупных зернах заполнителя они для прочности менее опасны по сравнению с порами в вяжущей, матричной части конгломерата или расположенными в пограничных зонах, нередко именуемыми как структурные поры материала. Прочность зависит также от прочности связующей фазы и межфазовой адгезии.

При воздействии статических или циклических тепловых факторов материал характеризуется теплопроводностью, теплоемкостью, температуроустойчивостью, огнестойкостью и другими теплофизическими свойствами.

Теплопроводность — способность материала проводить через свою толщу тепловой поток, возникающий под влиянием разности температур на поверхностях, ограничивающих материал. Это свойство характеризуется теплопроводностью X , которая показывает количество теплоты, проходящее через плоскую стенку толщиной 1 м и площадью 1 м² при перепаде температур на противоположных поверхностях в 1°С в течение 1 ч. Величина λ имеет размерность Вт/(м·К) и может служить убедительной сравнительной характеристикой при оценке теплозащитных свойств различных изотропных материалов в одномерном температурном поле. Она зависит, главным образом, от пористости материала: содержащийся в порах воздух, особенно в замкнутых порах, является малотеплопроводной средой. Воздух при атмосферном давлении и температуре +20°С имеет теплопроводность $\lambda = 0,023$ Вт/(м·К), а при температуре +100°С — 0,0306 Вт/(м·К), при 1000°С — 0,0788 Вт/(м·К).

С повышением температуры теплопроводность большинства строительных материалов увеличивается, что объясняется повышением кинематической энергии молекул, слагающих вещество материала: $\lambda_t = \lambda_0 (1 + \beta t)$, где λ_t и λ_0 — теплопроводность соответственно при температурах t и 0°С; β — температурный коэффициент, который показывает величину приращения коэффициента теплопроводности материала при повышении температуры на 1°С; t — температура материала, °С. Эта формула справедлива только при температурах не выше $t = 100^\circ\text{C}$; при более высоких значениях t величину λ_t определяют опытным путем.

С увлажнением теплопроводность материала возрастает, так как теплопроводность воды при 20°С равна 0,590 Вт/(м·К), а при 100°С — 0,656 Вт/(м·К). Если в порах вода замерзает, то теплопроводность материала еще больше увеличивается, поскольку лед имеет $\lambda = 2,1$, т. е. в 4 раза больше, чем вода. В справочной литературе приводятся значения λ различных строительных материалов в сухом состоянии при 20°С; они используются при тепловых расчетах, и для решения практических задач. В качестве примеров следует отметить, что гранит имеет теплопроводность 3,2—3,5, а кирпич керамический 0,80—0,85; бетон тяжелый — 1,0—1,5; минеральная вата, применяемая как утеплитель, — 0,06—0,09; мипора — 0,04—0,05 Вт/(м·К) и т. д. Следует отметить, что упомянутые материалы являются гетерогенными системами и в их отношении удобнее для практики квалифицировать так называемую эффективную теплопроводность. Она складывается из процессов передачи теплоты через конденсированные (твердые) фазы, поры (газы) и границы пор с твердым веществом. Эффективная теплопроводность твердых тел равна сумме этих процессов, определяемых экспериментально.

Теплоемкость характеризует способность материала аккумулировать теплоту при нагревании, причем с повышением теплоемкости больше может выделяться теплоты при охлаждении материала. Температура в комнате, например, может сохраняться устойчивой более длительный период при повышенной теплоемкости использованных материалов для

пола, стен, перегородок и других частей помещения, поглощающих теплоту в период действия отопительной системы. Это свойство материала оценивается с помощью так называемой удельной теплоемкости, которая показывает количество теплоты, необходимое для нагревания 1 кг материала на 1°С. Различают истинную теплоемкость при данной температуре и среднюю — в интервале температур. Удельную теплоемкость C иначе называют коэффициентом теплоемкости и численно определяют из выражения

$$C = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}, (3.2)$$

где Q — количество теплоты, затраченное на нагревание материала; m — масса материала, кг; $t_2 - t_1$ — разность температур материала до и после нагревания, °С. Ее размерность Дж/(кг·К).

Коэффициент теплоемкости воды равен $4,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К). Строительные материалы в сухом состоянии имеют более низкие значения этого коэффициента, например, каменные материалы (естественные или искусственные) — от $0,75 \cdot 10^3$ до $0,94 \cdot 10^3$, лесные материалы — от $2,42 \cdot 10^3$ до $2,75 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), сталь — $0,5 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) и т. п. С увлажнением материала коэффициенты теплоемкости возрастают, вместе с тем возрастают и значения теплопроводности. Иногда требуется знать величину удельной объемной теплоемкости, например при расчете размеров печи. Под этой характеристикой понимается количество теплоты, необходимое для нагревания 1 м³ материала на 1°С.

Показатели теплопроводности и теплоемкости позволяют определять величину так называемого коэффициента теплоусвоения, характеризующего способность материала воспринимать теплоту при колебаниях температуры окружающей среды. В формулу для подсчета коэффициента теплоусвоения кроме упомянутых двух тепло-физических значений входят также величины средней плотности и периода колебания температуры.

Огнестойкость характеризует способность строительных материалов выдерживать без разрушения действие высоких температур в течение сравнительно короткого промежутка времени (пожара). В зависимости от степени огнестойкости строительные материалы разделяют на негорючие, трудногорючие и горючие. Негорючие материалы в условиях высоких температур не подвержены воспламенению, тлению или обугливанию. При этом некоторые материалы почти не деформируются (кирпич, черепица), другие могут сильно деформироваться (сталь) или разрушаться, растрескиваться (природные камни, например, гранит), особенно при одновременном воздействии воды, применяемой при тушении пожаров. Трудногорючие материалы под воздействием высоких температур тлеют и обугливаются, но при удалении огня процессы горения, тления или обугливания полностью прекращаются. К таким материалам относятся фибролит, гидроизол, асфальтовый бетон и др. Горючие материалы воспламеняются и горят или тлеют под воздействием огня или высокой температуры, причем горение или тление продолжается также после удаления источника огня. Среди них — древесина, войлок, битумы, смолы и др.

Если источник высокой температуры (выше 1580°С) действует на материал в течение длительного периода времени (соприкосновение с печами, трубами, нагревательными котлами и т. п.), а материал сохраняет необходимые технические свойства и не размягчается, то его относят к огнеупорным. Огнеупорными являются шамот, диас, магнезитовый кирпич и другие материалы, применяемые для внутренней футеровки (облицовки) металлургических и промышленных печей.

Материалы, способные длительное время выдерживать воздействие высоких температур (до 1000°С) без потери или только с частичной потерей прочности, относят к жаростойким, например, жаростойкий бетон, керамический кирпич, огнеупорные материалы и др.

Температуростойкость или термостойкость — способность выдерживать чередование (циклы) резких тепловых изменений, нередко с переходом от высоких положительных к низким отрицательным температурам. Это свойство материала зависит от степени его однородности и способности каждого компонента к тепловым расширениям. Последняя характеризуется коэффициентом теплового расширения — линейным или объемным. Линейный коэффициент показывает удлинение 1 м материала при нагревании его на 1°С, а объемный характеризует увеличение объема 1 м³ материала при нагревании его на 1°С. Чем меньше эти коэффициенты и выше однородность материала, тем выше Температуростойкость, большее количество циклов резких смен температуры материал может выдержать без нарушения сплошности. Для цементного бетона линейный коэффициент теплового расширения равен $(10—14) \cdot 10^{-6}$, для древесины вдоль волокон $(3—5) \cdot 10^{-6}$, для стали $(11—12) \cdot 10^{-6}$. Термическое расширение является упругим, и оно полностью обратимо. В основе возможного разрушения структуры лежат явления, под влиянием которых в материале возникают напряжения. Они возникают либо вследствие градиента температур, либо под влиянием изотропии теплового коэффициента линейного расширения. В обоих случаях возникновение и развитие напряжений связано с отсутствием условий для свободного изменения объема материала в элементах конструкции.

Отношение материала к статическим или циклическим воздействиям воды или пара характеризуется величинами водопоглощаемости, гигроскопичности, водопроницаемости, паропроницаемости, водостойкости. Эти важные физические свойства учитывают при работе материалов в условиях воздействия водно-паровой среды.

Водопоглощаемость — способность материала впитывать и удерживать воду. Процесс впитывания воды в поры называется водопоглощением и в лабораторных условиях проходит при нормальном атмосферном давлении. Образец постепенно погружают в воду или полного водопоглощения достигают кипячением его в воде, если температура 100°С не влияет на состав и структуру материала. Выдерживают образцы в воде в течение определенного срока или до постоянной массы.

Величина водопоглощаемости¹ определяется по массе: $B = (M_2 - M_1) \cdot 100 / M_1$, %, или по объему: $B_0 = (M_2 - M_1) \cdot 100 / v$, где M_1 — масса до водопоглощения; M_2 — масса после водопоглощения; v — объем образца. Водопоглощаемость меньше пористости, так как не все поры заполняются водой и удерживают ее.

Сходная величина водонасыщаемости определяется после насыщения материала (образца) водой под давлением 0,2—0,3 МПа или 0,1 МПа при условии, что в порах был предварительно создан вакуум с помощью специального вакуум-насоса. Водонасыщаемость всегда больше водопоглощаемости, так как при принудительном пропитывании под давлением заполняются не только крупные, но и тонкие поры и капилляры, недоступные воде при обычном процессе водопоглощения.

Гигроскопичностью называется способность материала поглощать влагу из влажного воздуха или парогазовой смеси. Степень поглощения воды или паров, которые частично конденсируются в порах и капиллярах материала, зависит от относительной влажности и температуры воздуха, парциального давления смеси. С увеличением относительной влажности и со снижением температуры воздуха гигроскопичность повышается.

За характеристику гигроскопичности принята величина отношения массы поглощенной влаги при относительной влажности воздуха 100 % и температуре +20°С к массе сухого материала.

Влагоотдачей называют способность материала отдавать влагу в окружающую среду. Она измеряется количеством воды, которое материал теряет в сутки при относительной влажности воздуха 60 % и температуре +20°С. Влага, находящаяся в тонких порах и

¹ Нередко величину водопоглощаемости называют водопоглощением хотя этот термин характеризует процесс поглощения воды материалом и не относится к свойству материала.

капиллярах, удерживается весьма прочно, особенно адсорбционно-пленочная влага, что способствует ускоренному передвижению поглощаемой воды по сообщающимся порам в материале. Если между влажностью окружающей среды воздуха и влажностью материала устанавливается равновесие, то отсутствуют гигроскопичность и влагоотдача, а состояние принято именовать воздушно-сухим.

Водопроницаемость — способность материала пропускать через себя воду под давлением. Характеристикой водопроницаемости служит количество воды, прошедшее в течение 1 ч через 1 см² поверхности материала при заданном давлении воды. Иногда она также характеризуется периодом времени, по истечении которого появляются первые признаки просачивания воды под определенным давлением через образец испытываемого материала. Давление воды устанавливается стандартом в зависимости от вида материала.

Пара- и газопроницаемость оценивается с помощью особых коэффициентов, сходных между собой. Они равны количеству водяного пара (или воздуха), которое проходит через слой материала толщиной 1 м, площадью 1 м² в течение 1 ч при разности давлений 10 Па.

Водостойкость — способность материала сохранять в той или иной мере свои прочностные свойства при увлажнении. Числовой характеристикой водостойкости служит отношение предела прочности при сжатии материала в насыщенном водой состоянии (R_B) к пределу прочности при сжатии в сухом состоянии ($R_{сух}$). Это отношение принято называть коэффициентом размягчения (*Крым*). К водостойким относятся строительные материалы, коэффициент размягчения которых больше 0,8, например гранит, бетон, асбестоцемент и др. Эти материалы можно применять в сырых местах без специальных мер по защите их от увлажнения. На стабильность структуры и свойств материала заметное влияние оказывает попеременное увлажнение и просыхание. Некоторые материалы принято проверять на водостойкость путем циклического насыщения образцов водой и их высушивания.

В жестких условиях находится тот материал, который увлажняется при резких температурных перепадах. Вода, поглощенная материалом, особенно порами в поверхностном слое, замерзает при переходе через нулевую температуру с расширением на 8,5%. Ритмично чередующаяся кристаллизация льда в порах с последующим оттаиванием приводит к дополнительным внутренним напряжениям. Могут возникнуть микро- и макротрещины со снижением прочности, с возможным разрушением структуры. Способность материала, насыщенного водой, выдерживать многократное попеременное (циклическое) замораживание и оттаивание без значительных технических повреждений и ухудшения свойств, называется *морозостойкостью*. Установлены нормативные пределы допустимого снижения прочности или уменьшения массы образцов после испытания материала на морозостойкость при определенном количестве циклов замораживания и оттаивания. Некоторые материалы, например бетон, маркируют по морозостойкости в зависимости от количества циклов испытания, которые они выдерживают без видимых признаков разрушения. Обычно образцы, насыщенные водой, замораживают в специальных морозильных камерах при температуре -17°C, а оттаивание организуют в воде, имеющей комнатную температуру. Продолжительность одного цикла составляет одни сутки. Многие материалы выдерживают 200—300 и более циклов. Могут применяться и ускоренные методы испытания на морозостойкость. В частности, к ним относится испытание на сохранность в солевых растворах при чередующейся кристаллизации соли в порах материала. В отношении некоторых материалов, например природного камня, о морозостойкости судят по величине коэффициента размягчения. Принято считать, что если коэффициент размягчения не ниже 0,9, то данный материал обладает достаточной морозостойкостью.

К физическим свойствам относятся также звукопоглощаемость, поглощаемость ядерных излучений и рентгеновских лучей, электропроводность, светопроницаемость и др. С помощью испытания соответствующих образцов определяют числовые характеристики этих свойств материала и сравнивают с допустимыми по нормам.

Химические свойства выражают способность и степень активности материала к химическому взаимодействию с реагентами внешней среды и, кроме того, способность сохранять постоянным состав и структуру материала в условиях инертной окружающей среды. Большинство строительных материалов проявляют активность при взаимодействии с кислотами, щелочами, агрессивными газами и другими средами. Кроме того, некоторые материалы проявляют склонность к самопроизвольным внутренним химическим изменениям в условиях инертной среды, что отражает неустановившееся равновесие внутренних химических связей. Постепенное или быстрое изменение структуры и ее разрушение под влиянием агрессивных химических и электрохимических процессов в материале называют коррозией.

Нередко изучается биохимическая стойкость материала против воздействия грибов, прорастания растений, порчи насекомыми, жучками-точильщиками. Часто изучают физико-химические свойства, выражающие способность веществ раскрывать межмолекулярные связи под влиянием физических явлений, особенно в поверхностных слоях, обладающих повышенной энергией.

К основным методам изучения физико-химических свойств материалов относятся определение: удельной поверхности порошкообразных материалов (наполнителей, цементов, пигментов и др.); гидрофобности неорганических порошков; величины поверхностного натяжения; размера и количества пор в материале, в частности, с применением сорбционных методов и др.; способности адсорбентов (порошкообразных веществ разной активности) поглощать и удерживать (физическим и химическим путем) жидкостные слои в тонкопленочном состоянии и др. Для реализации такого рода методов с получением требуемых физико-химических характеристик материала используют приборы и аппараты, описываемые, как и сущность методов, в физической химии. К основным направлениям этой важнейшей науки относятся: изучение строения веществ и их свойств в различных агрегатных состояниях, изучение химической термодинамики, равновесных состояний, кинетики химических реакций.

Комплексной характеристикой способности материала сопротивляться одновременному или поочередному (в разной последовательности) воздействию механических, физических, химических и физико-химических факторов служит долговечность. О долговечности, измеряемой в единицах времени, судят или по ухудшению качества до определенного (критического) предела, или по изменению главных (ключевых) структурных элементов и тоже до определенных пределов (см. 4.2).

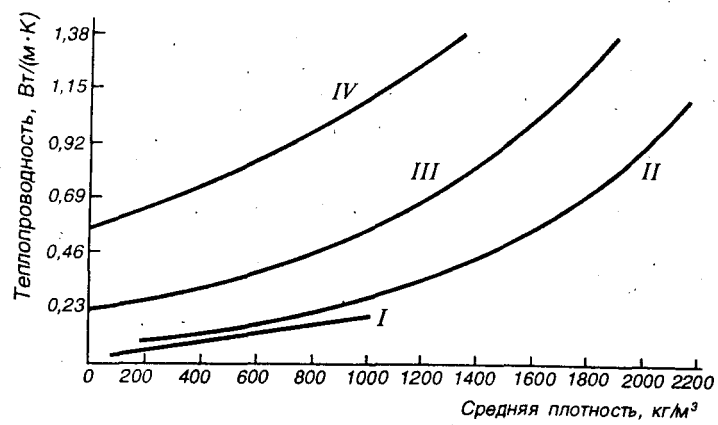
3.1.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Технологические свойства выражают способность материала к восприятию технологических операций, выполняемых с целью изменения его формы, размеров, характера поверхности, плотности и др. Эти свойства определяются числовыми значениями или визуальным осмотром с оценкой способности материала к формуемости (жесткие, пластичные и литые смеси), раскалываемости, шлифуемости, полируемости, дробимости, гвоздимости (удерживанию гвоздя при силовых воздействиях) и другим показателям технологических качеств. Для оценки свойств разработаны и, как правило, стандартизированы специальные методы и приборы, установлены определенные температурные условия для испытаний, скорости нагружения образцов и т. п.

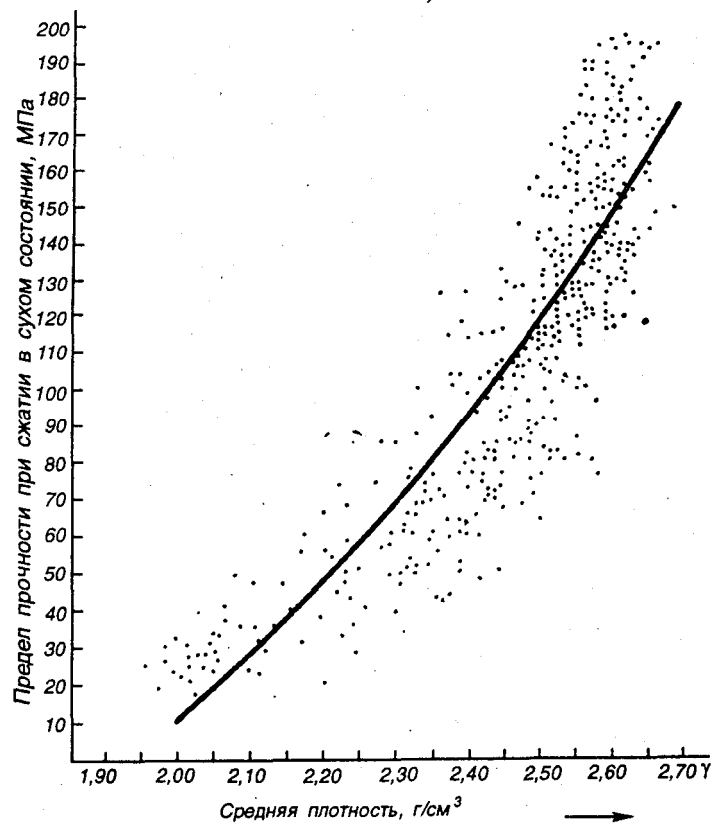
Строительные материалы и изделия обладают многообразными свойствами, между которыми имеются не только различия, но и теснейшая взаимосвязь. Она нередко позволяет оценивать качественные показатели по другому свойству или комплексу других свойств того же материала. Так, например, на рис. 3.4, *а* показана зависимость теплопроводности от средней плотности органических и неорганических материалов разной влажности, а на рис. 3.4, *б* — зависимость предела прочности при сжатии от средней плотности известняков в сухом состоянии. Этим и другим аналогичным графическим зависимостям могут быть приданы математические выражения в виде эмпирических формул с определением по ним числовых значений свойств, если заданы или известны другие.

Закономерная связь между пределом прочности (R) и величиной средней плотности (ρ_0) используется для оценки эффективности материала в конструкциях вычислением условного коэффициента конструктивного качества (ккк) по формуле: $\text{ккк} = R, \text{ кг/см}^2 / \rho_0, \text{ кг/м}^3$. Он равен: у стали 0,5, у древесины — 0,7, специальной стали — 1,2, пластмассы — 0,5—2,5, кирпича керамического — 0,05—0,1, ситалла — 2,5—5,0. Чем выше ккк, тем выше техническая эффективность материала, выше качество его в конструкциях.

Четко выраженная закономерная взаимосвязь структурочувствительных свойств производится при оптимальных структурах. Экстремумы числовых значений этих свойств размещаются практически на одной прямой линии в плоскостной системе координат «свойства — структурный показатель», образуя общий створ из экстремумов свойств. Такая закономерность получила название закона створа (см. гл. 3.2).



а)



б)

Рис. 3.4. Зависимость теплопроводности от средней плотности материалов различной влажности; I — 2%, II — 3,8%, III — 8%, IV — 11% (а) и зависимость предела прочности при сжатии от средней плотности известняков в сухом состоянии (б)

3.1.5. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ

Качество материалов оценивают совокупностью числовых показателей технических свойств, которые были получены при испытаниях соответствующих образцов. Существуют стандарты, устанавливающие для большинства материалов и изделий обязательные методы испытаний.

На продукцию, имеющую межотраслевое значение, разрабатываются Государственные стандарты (ГОСТы) Российской Федерации. Они содержат требования к безопасности этой продукции для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества, а также пожарной безопасности. Кроме того, в них приводятся основные показатели и методы контроля качественных характеристик материала. Нередко в ГОСТе сообщается классификация материала по одному или нескольким признакам. Указываются конкретные числовые значения свойств с маркировкой выпускаемой продукции, правила приемки и хранения материала, допуски и посадки изделий.

Кроме государственных имеются стандарты отраслевые, разрабатываемые министерствами на свою продукцию, — материалы или сырье сравнительно ограниченного ассортимента и применения. Существуют стандарты на строительные материалы, выпускаемые отдельными предприятиями. Они обязательны для данного предприятия (фирмы) при доставке продукции по договору. Имеются стандарты научно-технических, инженерных обществ и других общественных объединений. Стандарты (ГОСТы) периодически обновляются на основе последних достижений науки, техники и технологии. Они имеют силу закона, т. е. их категорически запрещено нарушать. Они не являются объектом авторского права (ст. 6 Закона о стандартизации).

Большинство строительных материалов, применяемых для несущих конструкций и работающих под влиянием статических или динамических нагрузок, маркируют с учетом их реальных прочностных показателей. Для теплоизоляционных, гидроизоляционных, акустических и некоторых других материалов принимают с целью маркировки не прочностные, а другие физические свойства — теплопроводность, водонепроницаемость, морозостойкость, среднюю плотность и т. п.

При окончательном выборе материала для строительного объекта большую роль играет экономический показатель. При одинаковом качестве стремятся выбрать материал самый дешевый и доступный по его запасам в регионе строительства, особенно, если он местный, но с учетом, конечно, транспортных расходов, а также вероятной эксплуатационной стойкости (долговечности) в конструкциях.

Удовлетворение всех необходимых технических требований, отмеченных ранее, является обязательным условием выхода строительного материала хорошего качества. Однако этого условия недостаточно для выхода материала высшего качества. Тогда потребуются, чтобы те же числовые показатели свойств были равны экстремальным значениям их при оптимальных структурах. Высшее качество выпускаемой продукции служит первым и основным критерием прогрессивных технологий в строительном материаловедении (см. гл. 6).

3.2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРИ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ ИСК

Под влиянием многообразия комбинаций микрочастиц в пространстве, или комплекса этих комбинаций, формируются материалы, которые отличаются между собой типом связей, порядком сцепления частиц и свойствами. Возможны изменения установившихся сочетаний и отношений частиц или их комплексов под влиянием температурных отклонений, изменений в величинах внешних давлений или других внешних факторов, что отражается на устойчивости равновесия структуры и числовых значений свойств. При каждом отклонении, возникшем в структуре материала, наиболее быстрому изменению подвержены механические свойства. Однако, нелегко установить и, тем более, выразить в конкретной или абстрактно-логической форме характер установившейся зависимости между структурой и свойствами. Одному и тому же показателю свойств, например величине предела прочности, могут соответствовать различные микро- и макроструктуры материалов, а одному и тому же структурному показателю — разные прочностные или другие свойства (рис. 3.5). Следует отметить, что и результаты испытаний при так называемых «равных» условиях опыта значительно отличаются между собой. Чтобы установить прямую или обратную взаимозависимость (корреляцию) между качественными и структурными показателями, необходимо сравнивать их не при «равных», а соответственных условиях, когда структуры — оптимальные, а материалы (ИСК) становятся подобными друг другу. В оптимальных структурах частицы не только равномерно распределены в объеме материала, особенно на микроуровне в кристаллических решетках, но и на расстояниях, при которых силы притяжения и отталкивания равны между собой, а величина их равнодействующей равна нулю, что характерно для равновесного состояния атомов в решетке. Энергия принимает минимальное значение (рис. 3.6), вследствие чего система (материал) обладает относительно устойчивым равновесным состоянием, положительно влияя на стабильность показателей свойств. Последние при оптимальных структурах принимают экстремальные значения. Следует, однако, учесть, что равновесное состояние может быть не только устойчивым, подобно состоянию частиц в кристалле, но и неустойчивым, как, например, состояние частиц в кристаллитах и гелях. В твердых телах пребывание частиц в неустойчивом равновесии может продолжаться неограниченное время.

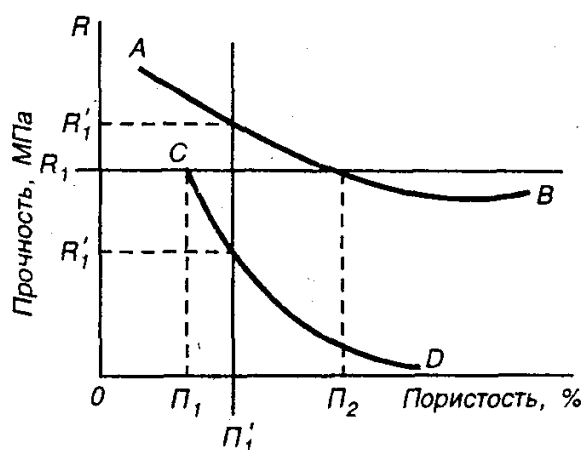


Рис. 3.5. График зависимости между структурными и качественными показателями материалов (линия AB характеризует снижение прочности бетона при повышении его пористости. Линия CD характеризует снижение прочности камня при повышении его пористости. Видно, что при равной пористости Π_1 прочность бетона может быть выше прочности камня и что при равной прочности R_1 пористость камня меньше, чем бетона)

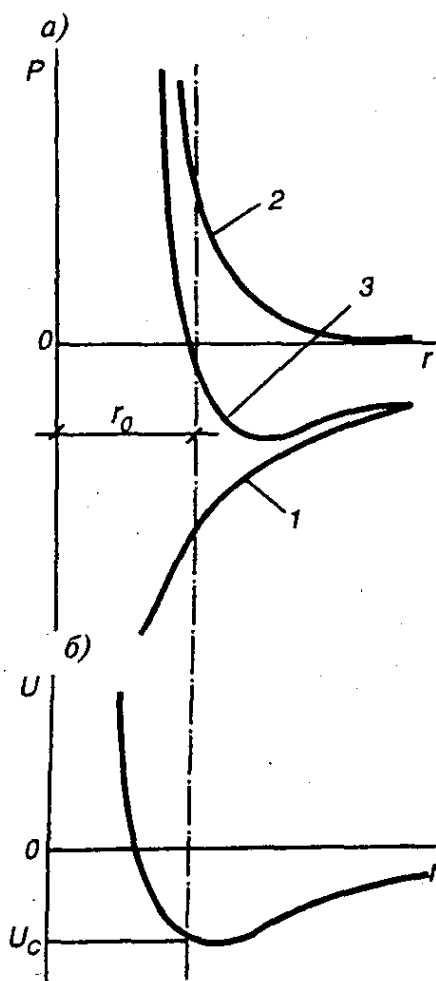


Рис. 3.6. Общий характер сил P и энергии U взаимодействия в зависимости от расстояния между частицами (а) и результирующая сила (б):

1 — силы притяжения возрастают с уменьшением расстояния r ; 2 — силы отталкивания быстро возрастают с уменьшением r ; 3 — результирующая сила. При $r=r_0$ сила $P=0$, а энергия взаимодействия $U_c \rightarrow \min$

Характер оптимальной структуры зависит от состава и технологии изготовления конгломерата. В природных условиях он связан с генетическими процессами, закономерное течение которых нередко нарушается стихийными факторами. С изменением технологических или генетических условий оптимизация структуры наступает при иных соотношениях компонентов, новом вещественном составе конгломерата.

Строительным материалам с оптимальной структурой присущи определенные закономерности в формировании и сохранении структурочувствительных свойств. Эти закономерности именуют как законы оптимальных структур. Известно, что под законом понимается существенная, устойчивая, необходимая (т. е. неслучайная) связь и взаимная обусловленность явлений и процессов. Законы оптимальных структур выражают внутреннюю связь и взаимообусловленность свойств и структурных параметров материала. Они распространяются на разнородные по составу и технологии изготовления материалы и, подобно другим многим законам, имеют объективный характер. Последнее указывает на то, что в аналогичном выражении они имеются также и в природе. Человек стремится познать их в природе и использовать в своей практической деятельности.

3.2.1. ЗАКОН СТВОРА¹

Закон створа устанавливает: оптимальной структуре соответствует комплекс экстремальных значений свойств. Его можно выразить и как соответствие комплексу наиболее благоприятных показателей строительных и эксплуатационных свойств конгломерата оптимальной структуры. На рис. 3.7 закон створа представлен графически в прямоугольной плоскостной системе координат «свойства — структурный фактор». Еще полнее он изображается в пространственной системе координат с отложением: на оси абсцисс $O-(с+ф)$ — одной из структурных характеристик, например содержания среды, фазового отношения, толщины (абсолютной или относительной) пленки среды в свежеизготовленном материале и др.; на оси аппликат $O-(П+Щ)$ — содержания вяжущего или заполнителя, в % по массе; на оси ординат $O-R$ — значений одного или нескольких технических свойств (рис. 3.8).

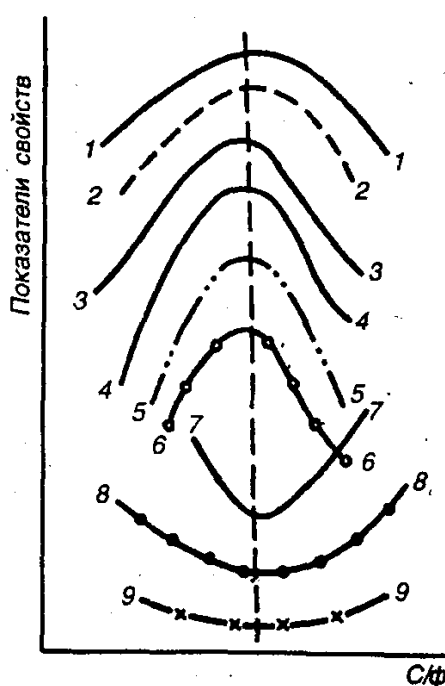


Рис. 3.7. Графическое выражение закона створа:

1 — средняя плотность; 2 — экономическая эффективность; 3 — пределы прочности; 4 — морозостойкость; 5 — внутреннее сцепление; 6 — упругоэластические свойства; 7 — ползучесть; 8 — подвижность; 9 — коэффициент выхода смеси

Полученные по экспериментальным данным графические зависимости в системе координат на плоскости или в пространстве для числовых значений каждого свойства, непосредственно связанного со структурой, имеют характер экстремальных кривых. В них имеются две ниспадающих или возрастающих ветви с максимумом или минимумом числовых значений свойств между ними. Последние практически размещаются на одной прямой линии, т. е. в общем створе.

Все точки экстремумов данного свойства отражают структуру, при которой удовлетворяются необходимые требования ее оптимальности: равномерное расположение частиц, минимум дефектов; непрерывность слоя вяжущего (или среды) при минимальной его толщине с минимумом фазового отношения ($с/ф \rightarrow \min$). Очевидно, что другие точки

¹ Рыбьев И.А. Открытие закона створа, его сущность и значимость // Строительные материалы, технологии, оборудование XXI в. 1999. 3-4.

правой и левой ветвей экстремальной кривой не соответствуют совокупности условий оптимальности структуры.

Из графиков видно, что неоптимальных структур гораздо больше, чем оптимальных, поскольку на каждой экстремальной кривой имеется только один экстремум показателя свойств, тогда как на ветвях этой кривой, справа и слева от экстремума, имеется бесконечное

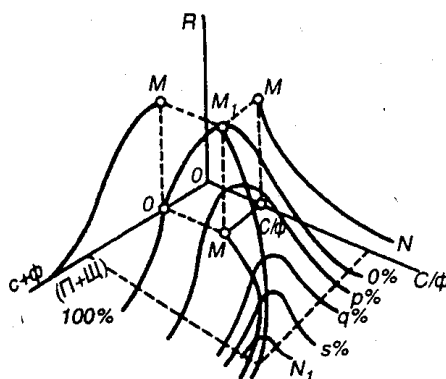
множество точек и каждая из них не соответствует условиям оптимальной структуры. Вместе с тем линия MN , соединяющая вершины отдельных экстремальных кривых, представляет собой непрерывную систему оптимальных структур и им соответствующих створов с определенными комплексами экстремумов свойств. Для конкретных строительных целей выбирается тот створ, который удовлетворяет основным показателям качества материала по техническому проекту здания или сооружения, конструкции или ГОСТа. Выбору необходимого створа помогает общий метод проектирования оптимальных составов ИСК. В кратком изложении он приводится ниже (см. 3.4).

У природных материалов, например горных пород (камня), такого рода непрерывно сменяющиеся системы оптимальных структур встречаются реже. Для них более частым является формирование отдельной оптимальной структуры какого-либо камня. И тогда для такой породы (песчаника, известняка и др.) действуют общие закономерности изменения свойств, аналогичные тем, которые отмечались в отношении ИСК: по мере увеличения пористости как структурного показателя снижается величина упругих деформаций, прочности, средней плотности и других свойств. Закон створа в отношении природных материалов (горных пород, минералов, древесины) действует так же, как у ИСК, т. е. он является объективной закономерностью.

Возможно обратное действие закона створа: если материал обладает одним или большим количеством экстремальных значений свойств, непосредственно отражающих его структуру, то она, следовательно, оптимальная. Нередко достаточно и одного экстремума свойств, например максимума той или иной прочности, чтобы судить об оптимальности структуры материала.

Закон створа является следствием воздействия физических, физико-химических и технологических факторов и явлений.

Физическая природа явлений, обуславливающих действие закона створа, состоит в том, что при оптимальных структурах наступает уравнивание сил притяжения и отталкивания между структурными микрочастицами. Вследствие этого значения свободной энергии Гиббса и свободной внутренней энергии Гельмгольца становятся минимальными. И тогда в данных условиях возникает равновесная система, устойчивая или иногда может быть и неустойчивая, но стабильная в течение длительного времени. Чем полнее в технологический (или генетический у горных пород) период была израсходована свободная энергия с переходом ее в энергию связи между микрочастицами, тем ярче выступают экстремумы свойств как функции энергии. Положение экстремума обусловлено также минимумом микропор или других микродефектов в структуре.



Физико-химическая природа закона створа связана с поверхностной энергией, возникающей в результате дробления и измельчения исходных твердых материалов, а также под влиянием некоторых других технологических операций, например введения добавок, нагрева. Увеличение дисперсности частиц и поверхностной энергии, равной произведению прироста поверхности на величину поверхностного натяжения, повышает активность компонентов к процессам структурообразования. В соответствии с принципом Гиббса-Кюри ускоряется выделение из растворов и расплавов новой, например кристаллической, фазы. Процесс же роста концентрации кристаллической фазы обуславливает упрочнение материала, повышение плотности и улучшение качественных показателей, что при оптимальных структурах приводит к возникновению комплекса экстремальных показателей свойств.

Технологическая природа закона створа (у искусственных) или генетическая природа его (у природных материалов) заключается соответственно в принудительном создании или формировании естественным путем структуры, которая характеризуется минимальным содержанием микро дефекте в, минимумом капиллярных пор, способных удерживать инородный ингредиент (например, влагу), оптимальной плотностью. Общий метод проектирования оптимальных составов и структур материалов обеспечивает не только заранее заданный комплекс требуемых свойств, но и их экстремальные числовые значения. Реализация запроектированного состава в технологическом процессе позволяет получать материал оптимальной структуры и на уровне заданных показателей свойств, наиболее выгодный по экономической эффективности. Последнее следует, в частности, из того, что эффективность входит в створ наилучших показателей качества материала, становясь при оптимальной структуре как бы материализованной оценкой экономической эффективности.

Закон створа позволяет создавать новые материалы со строго заданным набором и уровнем показателей свойств, улучшать качество традиционных, решать другие практические задачи.

3.2.2. ЗАКОН И ФОРМУЛЫ ПРОЧНОСТИ ИСК ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Общий закон прочности ИСК оптимальной структуры устанавливает, что произведение прочности (в любых показателях) конгломерата оптимальной структуры на фазовое отношение его вяжущего вещества в некоторой степени есть величина постоянная: $R_{иск} \cdot (c/\phi)^n = \text{const}$. Эта закономерность может быть выражена и в отношении некоторых других свойств, чувствительных к изменениям в структуре. И тогда закон устанавливает, что произведение числовых значений функциональных свойств искусственных строительных конгломератов оптимальной структуры на степенную функцию фазового отношения его вяжущего вещества является величиной постоянной. Как отмечалось ранее, под условным выражением «фазовое отношение» понимается величина отношения массы среды к массе твердой высокодисперсной фазы в свежееизготовленном материале. Под постоянной величиной в законе прочности (и других свойств) имеется в виду произведение $R^* \cdot (c^*/\phi)^n$, что указывает, в частности, на динамичный характер закона, зависящий от качества вяжущего вещества и технологии, принятой на производстве. В непосредственной связи с законом прочности находятся и формулы для определения прочности конгломерата оптимальной структуры. Они следуют из анализа соответствующих графических зависимостей, наиболее четко выраженных в пространственной системе координат (см. рис. 3.8). Из графика на плоскости x — y видно, что

$$R_{иск} = \frac{k_1 \cdot R_6^*}{x^n}, \quad (3.3)$$

на плоскости y — z видно, что

$$R_{иск} = \frac{k_1 \cdot R_6^*}{100 \over (c + \phi)^m}, \quad (3.4)$$

а на плоскости x — z —

$$\frac{c}{\phi} = \frac{c^*}{\phi} \cdot \frac{100}{(c + \phi)^{m/n}}. \quad (3.5)$$

В формулах: k_1 — коэффициент пористости, определяемый как $\left(\frac{p_0 - p_x}{p_0} \right)^b$; p_0 —

пористость сухой смеси вяжущего вещества, %; p_x — пористость вяжущего вещества оптимальной структуры, равная обычно 2—3 %; b — показатель степени, равный 0,85—1,15. Учитывая относительно большую величину p_0 и малую p_x в экстремальной точке вяжущего вещества, значение k_1 практически приближается к единице, и поэтому нередко в формулах прочности коэффициент опускается, а в расчетах не учитывается (в плотных

ИСК); x — отношение фазовых отношений, т.е. $x = \frac{c/\phi}{c^*/\phi}$. Показано, что это отношение

по величине адекватно отношению осредненных толщин (δ , δ^*) пленок среды соответственно в вяжущем веществе конгломерата и в вяжущем веществе оптимальной структуры (в свежееизготовленных материалах). Действительно,

$$x = \frac{c/\phi}{c^*/\phi} = \frac{v \cdot \gamma}{S_{сум}/S_{уд}} : \frac{v^* \cdot \gamma}{S_{сум}^*/S_{уд}} = \frac{v}{S_{сум}} : \frac{v^*}{S_{сум}^*} = \frac{\delta}{\delta^*},$$

где v и v^* — объемы среды в вяжущем веществе соответственно конгломерата и при c^*/ϕ ; $S_{сум}$ и $S_{сум}^*$ — суммарные поверхности твердой фазы ϕ в вяжущем веществе конгломерата

и в вяжущем веществе оптимальной структуры при c^*/ϕ ; $S_{уд}$ — удельная поверхность твердой фазы вяжущего вещества (понятно, что она остается одинаковой по всей кривой оптимальных структур ИСК); γ — средняя плотность среды в вяжущем веществе (понятно, что она не меняется по всей кривой оптимальных структур).

Следовательно, величина δ показывает, во сколько раз фазовое отношение реального вяжущего вещества в конгломерате больше фазового отношения в вяжущем веществе оптимальной структуры (в точке М). Или, что то же, во сколько раз пленка среды (δ) в конгломерате толще пленки среды (δ^*) в вяжущем веществе оптимальной структуры. При этом толщины пленок среды принимаются осредненными, так как их величины зависят от диаметра твердых частиц фазы, и поэтому не являются постоянными. Показатели степени n и m отражают нелинейность зависимостей прочности соответственно от фазового отношения вяжущего вещества и от количественного содержания вяжущего вещества в конгломерате, причем величина n — постоянная, а величина m колеблется от 0 до некоторого максимального значения; они определяются экспериментальным методом.

Апостериорное определение прочности ИСК оптимальной структуры возможно и еще по одной общей формуле, в которой соединено влияние отношения фазовых отношений и количества вяжущего вещества $c+\phi$, а следовательно, и количества (по массе, в процентах) заполнителя, поскольку $\Pi+\Pi\phi = 100 - (c+\phi)$, %:

$$R_{иск} = \frac{k_1 \cdot R_B}{\sqrt{\left(\frac{c/\phi}{c^*/\phi}\right)^n \cdot \left(\frac{100}{c+\phi}\right)^m}}. \quad (3.6)$$

Эта необходимая для практики формула получена из формул (3.3) и (3.4) путем переумножения входящих в них членов и последующего извлечения квадратного корня. В формуле (3.6) отражено влияние качества заполнителей, использованных в ИСК, посредством показателей степени n (чем меньше показатель степени n , тем выше качество и плотность заполнителя) и m — показателя, зависящего от количества этого же компонента в смеси (чем больше заполнителя, тем большее значение и показателя m). Формулы тесно связаны между собой посредством равенства:

$\left(\frac{c/\phi}{c^*/\phi}\right)^n \cdot \left(\frac{100}{c+\phi}\right)^m$, получаемого на плоскости $x-z$ в пространственной системе координат (см. рис. 3.8).

Для пористых конгломератов (с пористостью выше 2—3%) используют газо- и пенообразующие добавки с целью поризации вяжущего вещества, а также пористые заполнители. В результате прочность ИСК снижается, но формулы для ее подсчета сохраняются прежними, так как сохраняются все требуемые признаки оптимальных структур. Важно только сохранить условие, чтобы реальное c/ϕ не было меньше расчетного c^*/ϕ , ибо в этом случае структура перестает быть оптимальной, а пленки среды — континуальными (непрерывными).

По физической сущности закон и формулы прочности ИСК отражают максимальные значения сил сцепления микро- и макрочастиц при минимальных расстояниях между ними вследствие минимальных толщин континуальных пленок среды. Они отражают также минимальную дефектность и наибольшую однородность.

С учетом зависимостей Гриффитса общая формула прочности конгломерата оптимальной структуры может быть выражена:

$$R_{иск} = \frac{k_2 \sqrt{\frac{G \cdot E}{l_k}}}{\left(\frac{\delta}{\delta^*}\right)^n \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^p} = \frac{k_2 \sqrt{G \cdot E}}{\left(\frac{\delta}{\delta^*}\right)^n \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^p \cdot l_k^{\frac{1}{2}}}, \quad (3.7)$$

где l_k — суммарная величина дефектов, способствующих концентрации напряжений, появлению, росту и ускорению роста микро- и макротрещин до критических размеров, что быстро снижает прочность по мере удаления параметров структуры от оптимальных; k_2 — поправочный коэффициент перехода от хрупкого к вязкому разрушению; G — удельная свободная поверхностная энергия; E — модуль упругости; $(\delta/\delta^*)^n$ — отношение толщин пленок среды соответственно в вязущем веществе ИСК и в вязущем веществе оптимальной структуры, т. е. при c^*/ϕ , а показатель степени n зависит от характера и плотности упаковки микрочастиц вязущего вещества; (r/r_0) — отношение межатомных (межмолекулярных) расстояний в микроструктуре вязущего вещества соответственно в момент разрушения и момент равенства сил притяжения и отталкивания, т. е. когда равнодействующая их равна нулю (рис. 3.6 и 3.9). Из формулы (3.7) следует, что в ее знаменатель входят разупрочняющие, а в числитель — упрочняющие факторы. Управление этими факторами составляет основу повышения прочности ИСК.

По формулам прочности ИСК оптимальной структуры определяют статическую и усталостную прочность. Для увеличения $R_{иск}$ необходимо повысить прочность вязущего — матричного вещества, увеличить плотность упаковки макрочастиц, снизить до оптимальных пределов толщину пленок среды в свежеизготовленном конгломерате, уменьшить до минимума содержание вязущего вещества при неперменном сохранении континуальной пространственной сетки среды. Необходимо также технологическими мерами добиваться минимума дефектов, наибольшей компактности микрочастиц. В некоторых пределах возможно поднять еще модуль упругости, т. е. жесткость материала. При направленном управлении прочностью ИСК следует стремиться к повышению членов формулы в числителе и к снижению — в знаменателе.

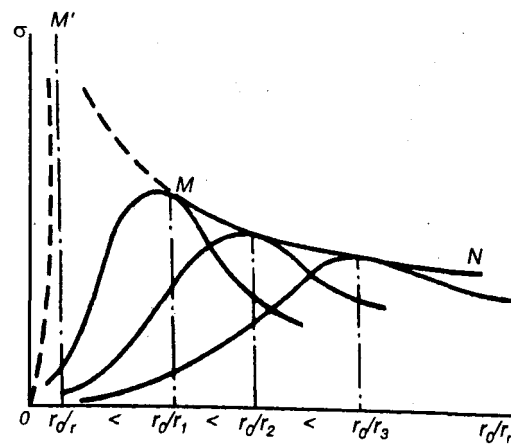


Рис. 3.9. График изменения прочности (или внутреннего напряжения) при увеличении, расстояния r между микрочастицами

Некоторые ИСК проявляют повышенную чувствительность к колебаниям внешней температуры (T) или к отклонениям в скорости (v) нагружения или скорости деформирования материала в конструкции. Тогда потребуется ввести в формулы прочности коррективы из опытных данных, а именно: если изменилась температура и она стала равной T_2 вместо прежней T_1 , то, согласно рис. 3.10, а, при неизменной скорости v_1 прочность ИСК будет равна:

$$R_{T_2, v_1} = R_{T_1, v_1} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^p, \quad (3.8)$$

где p — показатель степени, отражающий нелинейность изменения прочности ИСК с повышением температуры. При более высокой скорости v_2 приложения нагрузки или скорости деформирования, вместо прежней v_1 , но постоянной температуре, равной T_2 ,

прочность ИСК, согласно рис. 3.10, б, определяется по формуле $R_{T_2, v_2} = R_{T_2, v_1} \cdot \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k$,

(3.9)

где k — показатель степени, отражающий нелинейность изменения прочности ИСК с повышением скорости v .

Подстановкой значений R_{T_2, v_1} и R_{T_1, v_2} в формулу (3.9) и с учетом формулы (3.3) получаем в окончательном виде обобщенную формулу прочности ИСК:

$$R_{T_2, v_2} = R_{T_1, v_1}^* \left(\frac{\delta_1^*}{\delta_1} \right)^n \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^p \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k. \quad (3.10)$$

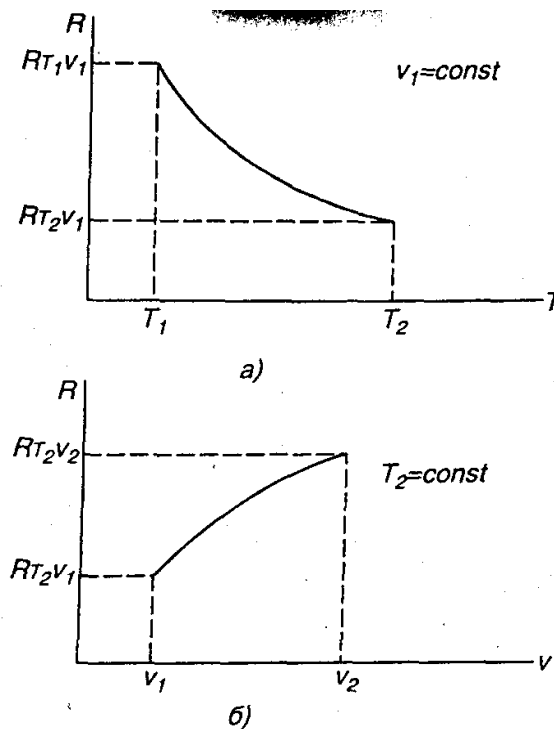


Рис. 3.10. Графики изменения прочности материала при повышении температуры (а) и изменения прочности материала при повышении скорости приложения нагрузки или скорости деформирования (б)

Многие хрупкие и псевдохрупкие материалы слабо реагируют на отклонения в определенных пределах температуры и скорости деформирования. Они практически не изменяют прочности под влиянием обычных колебаний этих факторов. В отношении их показатели p и k оказываются как бы равными нулю, а соответствующие симплексы — температурный и реологический — принимают единичные значения. Для этих материалов обобщенная формула прочности принимает вид общей формулы (3.6). К таким ИСК относятся, в частности, цементный бетон, силикатные изделия, керамические и им подобные материалы, реактопласты и др. К типичным нехрупким ИСК могут быть отнесены асфальтовые бетоны, полимербетоны на основе термопластов и др. Так,

например, степенной показатель теплостойкости у асфальтобетонов колеблется в пределах $p = 10,0—12,5$, а показатель деформационной стойкости $k = 0,12—0,20$ — в зависимости от типа макроструктуры (у порфировых — меньше, у контактных — больше).

3.2.3. ЗАКОН КОНГРУЭНЦИИ СВОЙСТВ

Закон конгруэнции устанавливает: при оптимальных структурах между свойствами вяжущего вещества и конгломерата на его основе, или между свойствами различных конгломератов на основе общего вяжущего вещества, или между свойствами различных конгломератов на основе различных вяжущих веществ существует обязательное соответствие. Этот закон означает, что при улучшении или снижении качества вяжущего вещества соответствующие изменения происходят и с качеством конгломерата, изготовленного на его основе, что в количественном отношении оценивается с помощью расчетных формул (прочности, упругих деформаций и др.). Естественно, что такая закономерность справедлива только для материалов оптимальной структуры. При неоптимальных же структурах нередко получают конгломераты худшего качества даже при улучшении вяжущего вещества, например, при более высокой марке цемента в бетоне. Этот закон еще раз подчеркивает, что только оптимизация структуры обеспечивает теснейшую взаимосвязь мероприятий по улучшению вяжущего (матричного) вещества и повышению качества конгломерата на его основе. В этой взаимосвязи ключевым связующим элементом является заполняющий компонент, значимость которого отражена в показателях степени n и m общей формулы прочности. Конкретный характер мероприятий зависит от разновидности вяжущего вещества и заполнителя, но определенную пользу всегда приносят: повышение дисперсности частиц твердой фазы; применение добавочных веществ (добавок) направленного действия; обработка с помощью физических активаторов и т. п.

Устойчивую конгруэнцию свойств между ИСК и его вяжущей частью выражают формулами

$$R_A = \frac{R^*}{x^n} \text{ и } R_B = R_A \cdot \frac{x_1^{n_1}}{x_2^{n_2}}, \quad (3.11)$$

где $x_1 = (c_1/\phi)/(c^*/\phi)$; $x_2 = (c_2/\phi)/(c^*/\phi)$; R_A и R_B — прочности двух ИСК оптимальной структуры, изготовленных на основе одного и того же вяжущего вещества (рис. 3.1 1, а, б).

Аналогичное выражение существует для перехода от одного семейства кривых с общим вяжущим веществом в точке $M_1(R_1^*, c_1^*/\phi)$ к другому семейству кривых с новым общим вяжущим веществом в точке $M_2(R_2^*, c_2^*/\phi)$:

$$R_B = R_A \cdot \frac{R^*}{R_1^*} \cdot \frac{x_1^{n_1}}{x_2^{n_2}}. \quad (3.12)$$

Соответствующие обозначения приведены на рис. 3.11, в.

Каждый гомоцентрический пучок (семейство кривых), исходящий из точек M_1, M_2, \dots, M_n , характеризуется различными исходными материалами, технологическими параметрами и т. п. Но точки M_1, M_2, \dots, M_n могут также относиться к одному вяжущему веществу, но с различием в заполнителях или главных технологических параметрах, принятых для изготовления ИСК. Следовательно, закон конгруэнции устанавливает принципиальную возможность взаимосвязи между прочностными свойствами различных конгломератов.

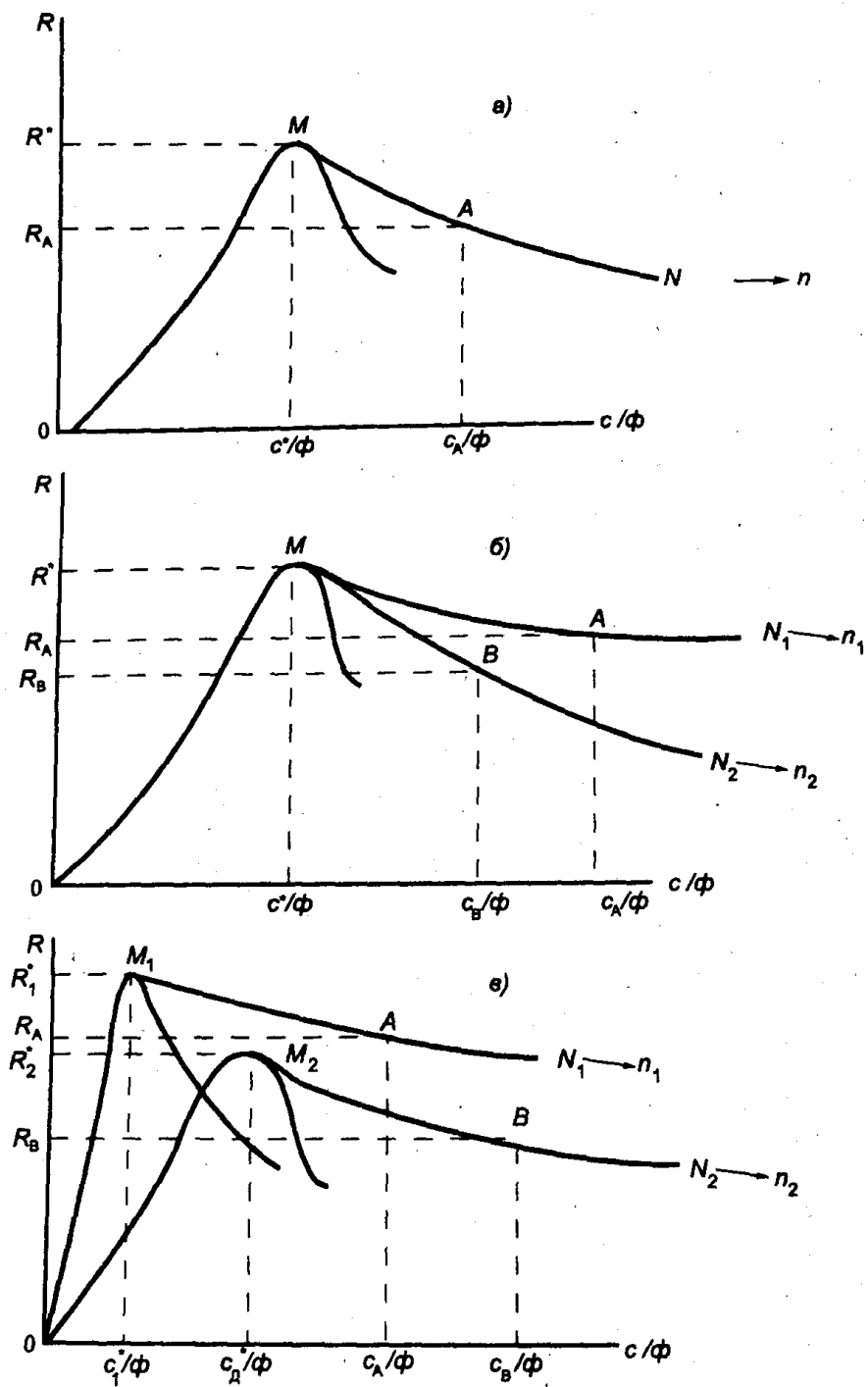


Рис. 3.11. Графики действия закона конгруэнции:
 а — при одном вяжущем и одном заполнителе; б — при одном вяжущем и двух заполнителях; в — при двух вяжущих и двух заполнителях

В аналогичных соответствиях находятся конгломераты оптимальных структур и по другим показателям механических и некоторых физических свойств, чувствительных к изменениям структуры.

Побочным следствием из общей формулы прочности и закона конгруэнции является взаимосвязь между активностью вяжущего матричного вещества и его количеством в ИСК оптимальной структуры. Чирловая зависимость выражается формулой, получаемой из двух уравнений пропорциональности: $R_{иск} = k_1 \cdot R^*$ и $R_{иск} = k_2 \cdot M^{1/2}$, в которых $R_{иск}$ — заданная, или проектная, прочность ИСК оптимальной структуры, k_1 — коэффициент (безразмерный), устанавливающий соответствие между значениями расчетной прочности вяжущего вещества и конгломерата; k_2 — коэффициент (размерный, МПа), устанавливающий соответствие расхода матричного вещества для получения заданной прочности ИСК при строгом фазовом отношении и обеспечении его оптимальной структуры; $M = c + \phi$ — количество матричного (вяжущего) вещества в долях единицы массы вяжущего компонента, определяемое с учетом (3.5); m и n — показатели степени, определяемые из экспериментальных данных.

Перемножением обоих уравнений пропорциональности и последующим извлечением квадратных корней получено

$$R_{иск} = k_3 \cdot R^* \cdot M^{m/2}, \text{ МПа, (3.13)}$$

где $k_3 = \sqrt{k_1 \cdot k_2}$ с учетом $(c/\phi)^n$ из общей формулы прочности.

Из формулы (3.13) следует целесообразность всемерного повышения расчетной активности (прочности) вяжущего вещества для снижения его расхода в строительном конгломерате оптимальной структуры.

Закон конгруэнции позволяет направленно совершенствовать производство, открывать новые материалы с заданными и, притом, экстремальными показателями свойств, прогнозировать по расчетной прочности вяжущего вещества показатели конгломерата, находить по заданной прочности ИСК расчетную активность вяжущего, т. е. его будущего матричного вещества при оптимальной структуре.

3.2.4. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИСК ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

От искусственного строительного конгломерата, работающего в несущих конструкциях зданий и сооружений, требуется, чтобы достаточная механическая прочность сочеталась с деформационной устойчивостью, т. е. с его способностью противостоять возникновению и развитию необратимых деформаций (пластических, ползучести) или появлению и росту микротрещин. Деформационная устойчивость проявляется в затухающем характере процесса формирования деформаций, в релаксационной способности материала, с повышением которой более интенсивно снимаются напряжения, возникающие под влиянием внутренних и внешних факторов — эксплуатационных нагрузок и собственного веса конструкции, тепловых и усадочных явлений. Имеются многочисленные примеры, когда конгломератный материал, обладая достаточной прочностью, проверенной по расчетным нагрузкам, преждевременно разрушается вследствие недостаточной деформационной устойчивости, появления и развития необратимых деформаций. Чрезмерно большое время (или период) релаксации, превышающее на несколько десятичных порядков периоды наблюдений или действия нагрузки, влияет на повышение хрупкости материала с возможным образованием трещин.

Наиболее деформационно-устойчивыми являются те конгломераты, которые характеризуются высокими значениями упругих и упруго-эластических деформаций в области определенного интервала температур и реального их перепада в конструкции. Упруго-эластические материалы характеризуются показателями эластичности — процентной долей спадающей деформации за определенный период времени (например, 5, 10, 30, 100 мин или больше) после их разгрузки от нагрузки P , равной по величине предельному напряжению сдвига, или какой-либо иной силовой нагрузки. Показатель эластичности выражается:

$$l_{\tau} = \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\tau}}{\varepsilon_{\tau}}, \quad (3.14)$$

где ε_0 — деформация сдвига (или другого характера), возникшая за время t_0 под нагрузкой P ; ε_{τ} — деформация, оставшаяся после упруго-эластического восстановления в течение выбранного периода времени τ_1 , когда нагрузка была снята ($jP = 0$).

По величине показателя эластичности ИСК условно разделяют на высокоэластичные, когда спад деформации наступает быстро, и низкоэластичные, при медленном спаде возникшей под нагрузкой деформации и после ее удаления. Очевидно, что, если материал в конструкции подвержен воздействию циклических нагружений и период между нагружениями (период «отдыха») будет соизмерим с продолжительностью спада низкоэластической деформации, то часть деформации сохраняется до нового цикла. С новым приложением нагрузки накапливается величина не спавшей части эластической деформации, и она постепенно может перерасти в необратимую, что создает предпосылки к деструкции материала и разрушению конструкции. В этом смысле любая деформация, в том числе и упругая, влечет за собой предрасположение структуры к повреждению, развитию в ней дефектов и даже микрощелей, к длительному процессу разрушения. Прорастание микрощелей ускоряется по мере увеличения деформаций от многократного повторения (тем более при вибрационном характере нагружения) деформирования с переходом на конечной стадии в опасную трещину и разрушение.

Наибольшей упруго-эластической частью деформаций обладают вяжущие вещества при фазовых отношениях, равных c^*/ϕ , т. е. когда их структура оптимальная. На графике в системе координат $\varepsilon_{\text{в}}(c/\phi)$, как и для прочностной зависимости, наблюдается максимум (рис. 3.12). Слева и справа от максимума $\varepsilon_{\text{в}}^*$ располагаются вяжущие вещества тех составов, при которых упруго-эластические деформации имеют меньшую величину.

Наименьшей величиной необратимых деформаций обладает вяжущее вещество при c^*/ϕ , а слева и справа от минимума располагаются те вяжущие вещества, у которых

необратимые деформации быстро возрастают, например при использовании органических связующих материалов.

Снижение упруго-эластических и увеличение необратимых деформаций в левых ветвях кривой при значениях $c/f < c^*/f$ происходит вследствие возрастания пористости и дискретности пленки среды на частицах твердой фазы вяжущего вещества. Необратимые деформации ИСК, у которых составы размещаются левее экстремума, носят квазипластический характер.

Снижение упруго-эластических и увеличение необратимых деформаций в правых ветвях кривой при значениях $c/f > c^*/f$ происходит под влиянием возрастающего количества свободной среды (c) в конгломерате.

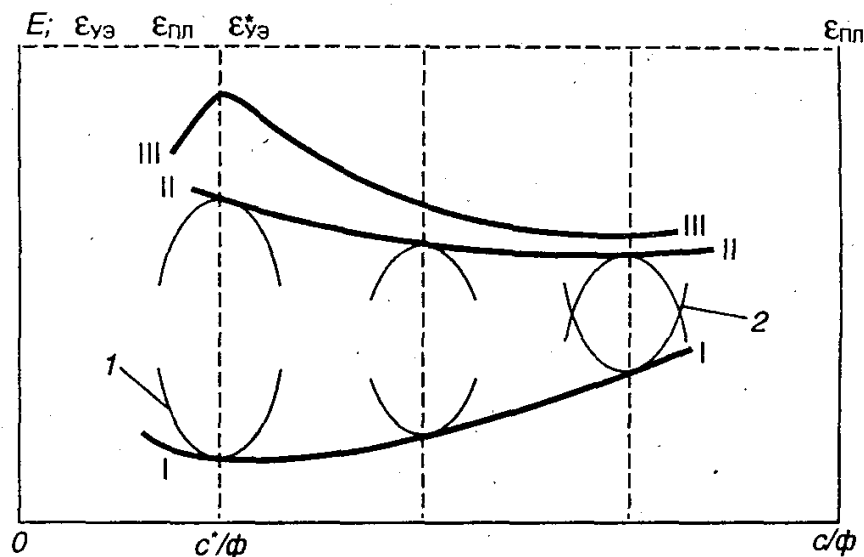


Рис. 3.12. Схема изменения деформационных свойств вяжущего вещества и конгломерата с изменением отношения c/ϕ :

$I-I$ — линия пластических деформаций $\epsilon_{пл}$; $II-II$ — линия упруго-эластических деформаций буз; $III-III$ — линия модулей упругости E , МПа; 1 — вяжущее вещество; 2 — ИСК с нарастающим количеством заполнителя

С постепенным добавлением к вяжущему веществу заполнителя (активного или неактивного) изменения деформаций, как и прочностных показателей, имеют экстремальный характер — минимум у необратимых и максимум у упруго-эластических свойств при фазовом отношении c/ϕ , при котором показатель прочности был максимальным (см. рис. 3.12). Чем больше содержится заполнителя в конгломерате, тем меньше величина упруго-эластических свойств и больше необратимых деформаций. Если соответствующие экстремумы соединить огибающей кривой, то, по аналогии с графиком прочности, получится линия, чаще всего в виде касательной к точкам максимумов или минимумов. Следовательно, все точки огибающей кривой обусловлены оптимальным составом конгломератов. Каждой точке кривой соответствует максимум прочности и упруго-эластических деформаций, но минимум пластических деформаций. Такое сочетание механических свойств является всегда наиболее желательным в отношении ИСК, используемых в строительных конструкциях зданий и сооружений. Точки на правых и левых ветвях кривых не обладают таким благоприятным сочетанием прочностных и деформативных свойств, а составы в этих точках не являются оптимальными. Структура содержит дискретность среды или повышенную пористость вторичного характера, например, под влиянием испарения части среды.

Огибающая кривая оптимальных составов, при которых в условиях принятой технологии обеспечиваются максимальные показатели упруго-эластических свойств, может быть с достаточной для практики точностью описана уравнением гиперболического вида, аналогичным уравнению (3.3):

$$\epsilon_{yz} = \epsilon^*/\chi^s. \quad (3.15)$$

В формуле показатель степени s определяют подобно тому, как показатель степени n в формуле (3.3).

Если величину напряжения, соответствующего прочности ИСК, разделить на относительную упругую деформацию, то получаемые значения модулей упругости можно нанести на общий график в системе $E(c/\phi)$. С увеличением количества заполняющей части в конгломерате и соответственно с увеличением фазового отношения вяжущего вещества в нем снижается величина модуля упругости, т. е. конгломерат становится менее жестким.

Деформативность и модуль упругости, от которых зависит полная деформационная устойчивость ИСК, непосредственно связаны, как и прочность, со структурой материала. При этом, чем в большей мере структура вяжущего вещества соответствует коагуляционной, тем более типичными являются необратимые деформации, ниже показателя прочности и модуля упругости. С увеличением в вяжущем веществе кристаллизационной фазы возрастает доля упругой или упруго-эластической деформации. При постоянной структуре характер деформации обусловлен величиной напряжения и продолжительностью напряженного состояния, релаксационной способностью конгломерата. Последняя, в свою очередь, зависит от фазовых соотношений, содержания вяжущего и заполнителя, его разновидности, т. е. от структуры и отдельных структурных элементов.

Обобщая формулы (3.3) и (3.15), можно сформулировать общую закономерность механических свойств ИСК.

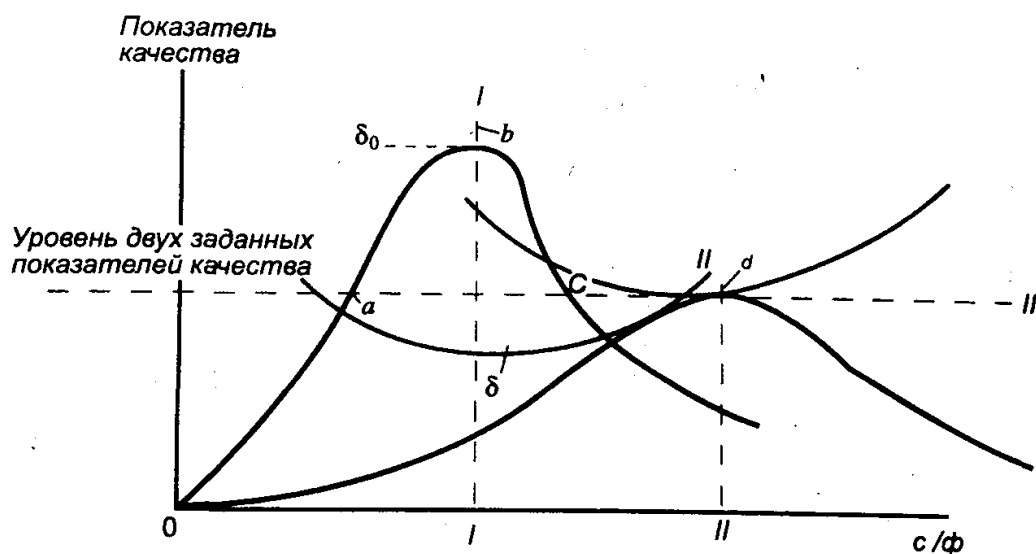


Рис. 3.13. График соответствия показателей качества ИСК в створах I—I и II—II заданному уровню III—III

Общие и объективные законы оптимальных структур не изолированы друг от друга, а взаимосвязаны в единую систему, и их обычно используют в совокупности, например при проектировании составов смесей или при разработке новых конгломератных материалов и технологий их изготовления. Важно, чтобы получаемые проектные составы обеспечивали при данной технологии оптимальную структуру, а технические свойства строго соответствовали не только уровню заданных показателей, но и их экстремальным значениям (рис. 3.13), т. е. не участку *abc*, а экстремуму *d*. В точках «δ» избыток показателя качества должен быть обоснован экономическим расчетом и эксплуатационными данными.

3.3. ПОДОБИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУР И ДВЕ ТЕОРЕМЫ В ТЕОРИИ ИСК

В основе моделирования исследований и общих законов изменения свойств в теории ИСК лежит важное научное положение о подобии оптимальных структур. Имеется в виду подобие геометрическое, физическое и технологическое. Как известно, фундаментальные работы в области теории подобия выполнены Берtrandом Н.С., Кирпичевым В.Л., Афанасьевой Т.А., Кирпичевым М.В., Седовым Л.И., Гухманом А.А., Вениковым В.А. и др. Были разработаны и убедительно доказаны три теоремы о подобии систем, а также о соответствующем их моделировании.

Геометрическое подобие в этой теории устанавливается при условии равенства сходственных углов и пропорциональности сходственных длин у геометрических фигур одинаковой формы. В оптимальных структурах искусственных конгломератов, размещающихся на гиперболических кривых MN_1 или параболических кривых MN_2 (см. рис. 3.8), в качестве таких геометрических фигур выступают континуальные пленки связующего вещества или матрицы. Вдоль упомянутых гиперболической или параболической кривых оптимальных структур отношение толщин δ/δ^* этих пленок, умножаемых на соответствующие коэффициенты масштабов подобия, остаются пропорциональными величинами. Другой геометрической фигурой практически одинаковой формы вдоль упомянутых кривых оптимальной структуры выступают сферические поры. С увеличением заполняющей части в конгломерате диаметр пор возрастает, что фиксируется с помощью коэффициентов масштабов подобия, как это было в случае отношений толщин пленок. Количество пор (пористость в единице объема) вдоль кривой оптимальных структур остается практически одинаковым (2—3%). Наличие этих двух сходственных элементов структуры и их количественных пропорциональностей фиксирует геометрическое подобие оптимальных структур.

Геометрическому подобию оптимальных структур сопутствует их физическое подобие. Физические явления, процессы или системы подобны, если сходственные величины, характеризующие состояние системы (в данном случае — оптимальной структуры) пропорциональны соответствующим величинам другой системы (т. е. другой оптимальной структуры конгломерата).

Для доказательства физического подобия оптимальных структур в теории ИСК используется ее первая теорема. Имеются два произвольных ИСК оптимальной структуры — А и Б. В отношении каждого из них действуют закономерности, которые ранее были установлены для материалов с конгломератным типом структуры. Требуется доказать, что конгломерат А физически подобен конгломерату Б. Для доказательства возможно использовать каждую из трех теорем, известных в теории подобия, или привлечь всех их вместе.

Согласно теореме подобия в формулировке М.В. Кирпичева (известной как первая теорема теории подобия), «подобные явления описываются буквенно-одинаковыми уравнениями, которые условно или безусловно инвариантны по отношению к подобным преобразованиям входящих в них величин». Известно, что в теории ИСК одинаковыми буквенными уравнениями описываются прочность и вне зависимости от напряжения, которое она выражает, деформативность и, в частности, величина упругих, не пластических (т. е. обратимых) деформаций. Соответствующей им величиной выражается и модуль упругости. В буквенные сходственные выражения уравнений входят подобные и притом инвариантные физические величины как характеристики оптимальных структур вяжущего вещества (матрицы) и качества заполняющего компонента конгломератов. Так, например, по условию доказываемой теоремы прочность конгломерата А

равна: $R_A = R^* \left(\frac{\delta^*}{\delta_A} \right)^n$, а прочность конгломерата Б равна: $R_B = R^* \left(\frac{\delta^*}{\delta_B} \right)^m$. Понятно,

что обе эти формулы являются апостериорными. Однако, исходя из подобия, возможно априори написать, что прочность еще одного конгломерата, например В, будет равна:

$$R_B = R^* \left(\frac{\delta^*}{\delta_B} \right)^k \text{ и т. д. Таким образом, в полном согласии с теоремой М.В. Кирпичева}$$

«подобные явления описываются буквенно одинаковыми уравнениями» и, следовательно, принятые по условию конгломераты А, Б, В оптимальной структуры геометрически и физически подобны между собой, что и требовалось доказать.

Для доказательства первой теоремы теории ИСК можно воспользоваться и второй теоремой теории подобия, называемой также Пи-теоремой и в свое время доказанной Бэкингом, Т.А. Афанасьевой и др. В ней при подобии явлений и систем устанавливается связь не только между реальными размерными — именованными — величинами, как по первой теореме М.В. Кирпичева, но и между их безразмерными комбинациями, именуемыми критериями подобия.

В теории ИСК из общей формулы прочности (и других свойств) следует, что $c_A / \phi^n \sqrt[n]{R_A / R^*} = c_B / \phi^n \sqrt[n]{R_B / R^*} = \dots = c / \phi^n \sqrt[n]{R / R^*} = c^* / \phi$, где c^* / ϕ выступает как

инвариант подобия, а величина $c / \phi^n \sqrt[n]{R / R^*}$ — как критерий подобия. Все числовые значения являются безразмерными, что полностью удовлетворяет условиям Пи-теоремы, а следовательно, конгломераты А и Б физически (при ранее отмеченном геометрическом подобии) подобны между собой, что и требовалось доказать.

Для доказательства первой теоремы ИСК можно воспользоваться и третьей теоремой теории подобия, выведенной М.В. Кирпичевым и А.А. Гухманом. Она устанавливает следующие необходимые и достаточные условия для подобия явлений и систем: геометрическое подобие, буквенная одинаковость уравнений (т. е. соблюдение первой теоремы теории подобия). Достаточным условием является равенство определяющих критериев подобия (т. е. вторая теорема теории подобия) или равенство единице критерия подобия, называемого тогда индикатором подобия. Выше показано, что в теории ИСК принят индикатор подобия А, предложенный И.А. Рыбьевым:

$$A = \left(R_{T_2, \nu_2} / R_{T_1, \nu_1}^* \right) \cdot \left(\delta_1^* / \delta_1 \right)^n \cdot (T_2 / T_1)^p \cdot (\nu_1 / \nu_2)^k. \quad (3.16)$$

При оптимальных структурах $A = 1$ и, следовательно, согласно третьей теореме теории подобия, конгломераты (в данном случае конгломераты А и Б) оптимальных структур подобны между собой, что и требовалось доказать.

Подобие структур сохраняется не только в данный момент, но и в течение времени, т. е. оно носит временной характер. Следует только обеспечить необходимую долговечность ИСК по его структурным и, следовательно, экстремальным качественным показателям. Временной характер подобия в теории ИСК указывает на технологическое подобие конгломератов оптимальной, структуры.

Цементные бетоны, асфальтобетоны, пластмассы, строительные растворы, древесностружечные плиты и т. п. применяют в конструкциях нередко в виде сложных сочетаний в системах, в которых отдельные конгломераты выступают в качестве подсистем. Однако и в этом случае каждый материал в системе должен иметь по возможности свою оптимальную структуру, поскольку тогда обеспечивается наилучшее качество всей конструкции. Согласно теореме В.А. Веникова, если подобны подсистемы, то оказываются подобными и сами системы. Следовательно, материалы оптимальной структуры не только подобны между собой, но и образуют в целом систему (строительную конструкцию) наилучшего качества, что способствует эффективному решению многих инженерных задач.

Кроме первой теоремы о подобии конгломератов оптимальной структуры, в теории ИСК имеется еще и вторая теорема — о правомерности закона конгруэнции для конгломератов

оптимальной структуры, изготовленных не только на общем, но и на основе различных вяжущих веществ. Выше, в 3.2.2, закон конгруэнции сформулирован в его полном объеме, однако его третья часть утверждения осталась недоказанной. Поэтому требуется доказать, что существует обязательное соответствие свойств между конгломератами оптимальной структуры при различных числовых значениях вяжущих веществ, а также показать масштабный критерий подобия в общем уравнении.

Для доказательства написано уравнение прочности конгломерата при первом вяжущем веществе:

$$R_{иск_1} = R_1^* / x_1^{n_1}.$$

То же — для второго вяжущего вещества: $R_{иск_2} = R_2^* / x_2^{n_2}$. Решая эти два

уравнения применительно к первому или второму конгломератам, находится формула (3.3), показанная ранее в 3.2.2. Из той же формулы (3.3) следует, что масштабным показателем подобия является отношение расчетных характеристик принятых вяжущих веществ, т. е. безразмерная величина, равная (R_2^* / R_1^*) , или ей обратная. Понятно, что присутствие масштабного показателя не нарушает доказательства первой теоремы о подобии конгломератов оптимальных структур.

3.4. НАУЧНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ОБЩИЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА ИСК ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Оптимизацию структуры и научно-обоснованное определение вещественного состава различных искусственных конгломератов осуществляют общим (единым) методом проектирования. Могут быть методы и специфические, разработанные применительно к каждой разновидности конгломерата. Некоторые специфические особенности выделяются и при применении общего (единого) метода. Однако остаются неизменными научные принципы, лежащие в основе проектирования состава любым методом. К главным научным принципам относятся: наибольшее приближение технологических режимов и параметров, используемых в лабораторной практике проектирования состава, к реальной технологии производства конгломератной смеси и изделий; обеспечение возможно большей равномерности распределения частиц разной крупности, пор, поверхностей раздела фаз и других структурных элементов по объему материала; обеспечение заданных свойств на уровне числовых значений экстремумов при оптимальной структуре; применение общих объективных закономерностей, присущих конгломератным материалам оптимальной структуры и, в том числе, закона конгруэнции, закона створа, закона прочности и других; использование общего метода и средств проектирования оптимального состава, и точная реализация проектного состава на производстве.

Практическая цель проектирования заключается в определении расхода исходных компонентов (по массе) на одну тонну или один кубический метр плотной смеси. После формования, уплотнения и отвердевания смесь приобретает оптимальную структуру ИСК, которому придана форма изделия или конструкции, используемых при монтаже зданий и сооружений в строительстве.

Реализация общего метода проектирования оптимального состава ИСК является существенной частью технологического процесса, которая в свою очередь является гарантом высшего качества изготавливаемой продукции в соответствии с полученным проектным составом. Этот метод включает три этапа.

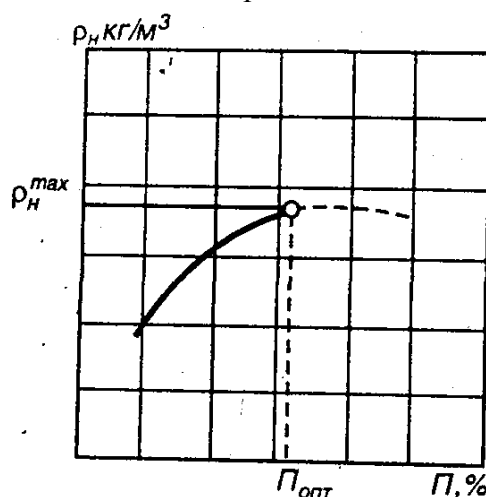


Рис. 3.14. Зависимость насыпной плотности смеси заполнителей (ρ_n) от содержания в ней песка (Π)

Первый этап предусматривает выполнение ряда исходных операций: обоснование главных показателей строительно-эксплуатационных свойств конгломерата, исходя из тщательного анализа реальных условий работы его в конструкциях; выбор исходных материалов, соответствующих их функциональному назначению как компонентов конгломерата; определение или проверка, если были указаны, технических свойства принятых материалов с привлечением стандартных нормативов и с учетом производственных или назначаемых по проекту технологических параметров и режимов. Для ответственных строительных объектов результаты первого этапа проектирования

состава конгломерата могут быть рассмотрены совместно со строительной организацией (заказчиком) как своеобразное техническое задание.

Второй этап — расчетно-экспериментальный и предназначен для определения расхода принятых компонентов на одну тонну, или на 1 м^3 , или на другое количество смеси (например, на один замес смеси в объеме смесительного аппарата). Он выполняется в определенной последовательности операций, исходя из основных зависимостей в их математических выражениях, которые можно использовать в программах, реализуемых в дальнейшем с помощью машинной техники. Первая операция в этой последовательности — определение расчетной активности принятого вяжущего вещества и минимального фазового отношения, т. е. R^* и c^*/ϕ . Впрочем, определение расчетной активности более часто относят к первому этапу проектирования состава при технической оценке исходных материалов. Вместо прочности может быть принято другое свойство материала — упругая деформация, плотность, вязкость, морозостойкость и т. п., в зависимости от назначения ИСК. Второй операцией на этом этапе проектирования служит определение состава плотной смеси заполнителя ρ_n (рис. 3.14). Третья и наиболее емкая операция — выявление количества исходных компонентов в смеси, из которой формируют конгломерат. Она выполняется с помощью формул и расчетных характеристик, безмашинным способом или с привлечением электронно-вычислительных машин. При необходимости определяют показатели тех же свойств при других значениях T и v .

Третий этап — изготовление пробного замеса проектного состава, по возможности в производственных условиях, например в смесительном цехе завода. С помощью лабораторных испытаний устанавливают качество смеси и отформованного конгломерата по всем предусмотренным свойствам. Особо устанавливают наличие оптимальной структуры, например по индикатору подобия или по кривым оптимальных структур. Если отмечены отклонения, то производят корректирование состава. Последнее может потребоваться и при выпуске массовой продукции на заводе, если исходные материалы получают время от времени другого состава и других свойств, чем были приняты в лаборатории на стадии проектирования состава.

Ниже детализируется рациональная последовательность проектирования состава ИСК в общем виде с изложением в некоторых последующих главах конкретных примеров при безмашинном и машинном способах.

Первый этап: определение расчетной активности вяжущего вещества (R^*) как матричной части ИСК и минимального значения c^*/ϕ , обеспечивающего при принятых технологических параметрах оптимальную структуру. Для этого из смеси вяжущего вещества с 3—4 различными c/ϕ , отличающимися между собой обычно на величину 0,02—0,05, изготавливают образцы, установленные стандартами при оценках свойств испытуемого материала. Для первых прикидочных опытов образцы могут приниматься меньших размеров в целях экономного расходования исходных компонентов. После всех испытаний и графического построения функции $R = f(c/\phi)$ находят и, при необходимости, уточняют искомое значение c^*/ϕ при наибольшей прочности вяжущего вещества R^* .

На первом этапе устанавливают также состав плотной смеси заполнителя (крупного — K и мелкого — M) расчетным или, что чаще, экспериментальным путем с определением соотношения по массе величины M/K .

Второй этап начинается с уточнения конкретных математических зависимостей, которыми предстоит воспользоваться в расчетах по составу конгломератной смеси. Здесь потребуется выполнить также две операции, одна из которых является вспомогательной (экспериментальной), другая — основной (расчетной).

Вспомогательная операция необходима для определения показателей степени n и m , используемых в формулах прочности и составов. Для этого по лабораторным данным строят кривую оптимальных структур (рис. 3.15) при произвольно выбранном значении $(c/\phi)_A$ в точке A на этой кривой. Находят величину R_A на кривой $ДВЕ$, а также значение $(c+\phi)_B$ в точке B . Прочность R_A имеется и на кривой KL , которой к началу эксперимента

хотя еще и нет, но о ее вероятном существовании, как кривой оптимальных структур на плоскости $x—y$ из теории ИСК известно. И тогда полученных данных R_A , $(c/\phi)_B$, (c/ϕ) достаточно, чтобы определить значения показателей степени n и m , согласно формулам (3.3) и (3.4), поскольку другие требуемые значения R^* и c^*/ϕ уже были определены на

первом этапе проектирования, а именно: $m = \frac{\lg \frac{R^*}{R_A}}{\lg \frac{100}{c + \phi}}$ и $n = \frac{\lg \frac{R^*}{R_A}}{\lg \frac{c/\phi}{c^*/\phi}}$.

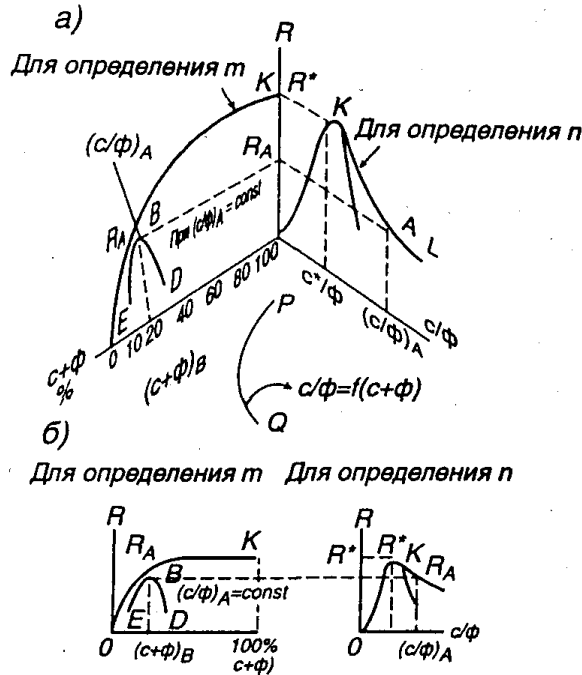


Рис. 3.15. Графики кривых оптимальных структур в пространственной системе координат $R=f(c/\phi; c+\phi)$ (а) и на плоскостях $R=f_1(c/\phi)$; $R=f_2(c+\phi)$; $c/\phi=f_3(c+\phi)$ (б); $c+\phi=100-(n+m)$ в %

Здесь важно учитывать, что величина n является постоянной, тогда как m — переменная, требующая корректирования для других значений c/ϕ или R . На этом вспомогательная операция второго этапа завершена. Следует переход к основной операции этого этапа — начислению количества расходов компонентов в проектом составе смеси. Рациональная последовательность расчетов:

а) искомое фазовое отношение вяжущего вещества, пользуясь формулой (3.4), а именно:

$$(c/\phi)_{иск} = (c^*/\phi)^m \sqrt[n]{\frac{R^*}{R_{зад}}}, \text{ где } R_{зад} - \text{величина прочности ИСК, состав которого}$$

проектируется;

б) искомое $c+\phi$ конгломерата, пользуясь формулами (3.3) и (3.4), а именно:

$$(c + \phi)_{иск} = \frac{100}{\left[\frac{(c/\phi)_{иск}}{(c^*/\phi)} \right]^{n/m_x}}, \text{ где } m_x \text{ отличается от ранее полученного значения } m, \text{ так}$$

как определяется при новом значении $(c/\phi)_{иск}$, а не при прежнем $(c/\phi)_A$, а именно:

$$m_x = m \frac{(c/\phi)_{иск}}{(c/\phi)_A};$$

в) искомое количество жидкого компонента с на 1 т смеси:

$$c = \frac{(c + \phi)_{иск} \cdot (c/\phi)_{иск}}{1 + (c/\phi)_{иск}} \cdot 10 \text{ кг/т};$$

г) искомое количество дисперсного твердого компонента смеси на 1 т:

$$\phi = \frac{(c + \phi)_{иск}}{1 + (c/\phi)_{иск}} \cdot 10 \text{ кг/т};$$

д) искомое количество заполнителя: $M + K = 100 - (c + \phi)_{иск}$;

е) искомое количество мелкого компонента в заполнителе при ранее найденном отношении M/K , а именно:

$$M = \frac{(M + K) \cdot M / K}{1 + M / K} \cdot 10 \text{ кг/т};$$

ж) искомое количество крупного компонента в заполнителе:

$$K = \frac{M + K}{1 + M / K} \cdot 10 \text{ кг/т}.$$

Все найденные значения c , ϕ , M , K умножены на 10 потому, что в 1 т (1000 кг) каждый 1% составляет 10 кг.

При необходимости производят перерасчет массы компонентов на 1 м³ конгломератной смеси (без учета воздушных пор) в следующей последовательности:

а) определение абсолютных объемов исходных материалов (при условии, что известны или были найдены на первом этапе проектирования значения их истинных плотностей δ_c , δ_ϕ , δ_M и δ_K), необходимых для образования 1 тонны смеси (т):

$10 \cdot c / \delta_c$; $10 \cdot \phi / \delta_\phi$; $10 \cdot M / \delta_M$; $10 \cdot K / \delta_K$;

б) определение средней плотности конгломератной смеси (кг/м³):

$$\gamma_{иск} = \frac{1000 \cdot 1000}{\frac{10 \cdot c}{\delta_c} + \frac{10 \cdot \phi}{\delta_\phi} + \frac{10 \cdot M}{\delta_M} + \frac{10 \cdot K}{\delta_K}};$$

в) определение материалов на 1 м³ конгломератной смеси (кг/м³):

жидкой среды: $c \cdot \gamma_{иск}$;

твердой фазы: $\phi \cdot \gamma_{иск}$;

мелкого заполнителя: $M \cdot \gamma_{иск}$;

крупного заполнителя: $K \cdot \gamma_{иск}$.

Третий этап: приготовление контрольного замеса (лучше в производственных условиях) с оценкой его качественных характеристик. При необходимости корректируют проектный состав с учетом влажности используемых минеральных компонентов смеси. Запроектированный и откорректированный состав передают на производство для использования его в строительстве.

3.5. КОРРЕКТИРОВАНИЕ ПРОЕКТНОГО СОСТАВА ИСК

Проектный состав является правильным до тех пор, пока материалы, применяемые на заводе, соответствуют требованиям, которые были приняты на стадии проектирования. В производственных условиях они, однако, могут отклоняться как по составу, так и по свойствам, поэтому необходим не только строгий текущий контроль за качеством используемых материалов, но и оперативное корректирование проектного состава конгломерата. Возможны три случая:

1. Изменились свойства вяжущего или его отдельных компонентов, если вяжущее по своему составу является сложным. В этом случае в заводской лаборатории необходимо определить новую величину расчетной активности вяжущего и соответствующее ей фазовое отношение (R^* при c^*/ϕ) и, пользуясь формулой (3.3), вычислить новое фазовое

отношение c/ϕ в конгломерате оптимальной структуры: $c/\phi = c^*/\phi^n \sqrt[n]{\frac{R^*}{R_{зад}}}$, а

формулой (3.4) — новое количество вяжущего вещества при этом фазовом отношении:

$$c + \phi = \frac{100}{\left(\frac{c/\phi}{c^*/\phi} \right)^{n/m}},$$

где n и $m = m_x \frac{c/\phi}{(c/\phi)_A}$ — числовые значения показателей степени, определяемые

опытным путем, о чем сообщалось выше — при выполнении вспомогательной операции на втором этапе проектирования состава.

Далее производится пересчет содержания каждого компонента на 1 т или на 1 м³ конгломератной смеси.

2. Изменились заполняющие материалы, хотя они продолжают отвечать общим техническим требованиям. В этом случае можно подобрать новое соотношение фракций заполнителя с выявлением нового соотношения (по массе) между мелким и крупным заполнителями (например, П/Щ) при наибольшей плотности их смеси. А затем при любом, практически удобном отношении c/ϕ определяют экспериментальным путем новые показатели степеней n и m_x , а расчетным путем — новые оптимальные значения c/ϕ и $c+\phi$. Далее пересчитывают прежний номинальный состав на новый, откорректированный.

3. Изменились все исходные материалы. В этом случае скорректировать состав можно путем определения новой величины расчетной активности вяжущего вещества и новых показателей степени n и m_x . После этого по формулам (3.3) и (3.4), исходя из закона обязательного соответствия свойств (конгруэнтности), определяют оптимальное отношение c/ϕ в конгломерате и новое количество вяжущего вещества $c+\phi$.

Во всех трех случаях весьма целесообразно пользоваться заранее подготовленными таблицами или графиками в соответствующих координатных осях (c/ϕ — % вяжущего вещества, n — c/ϕ и др.).

Аналогичным образом корректируют оптимальный состав, когда изменяются в производственных условиях технологические параметры и режимы, а также когда влага в заполнителе засчитывается как часть жидкой среды в проектном составе.

3.6. СОЗДАНИЕ НОВЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ

Общая теория ИСК способствует не только существенному повышению качества и совершенствованию технологий с переводом их в прогрессивные на уровне мировых достижений, но и созданию новых строительных материалов с конгломератным типом структуры. Именно поэтому в единой классификации предусмотрены вакантные «клетки». Каждая из них может быть в свою очередь центром развития своеобразной группы конгломератов определенной разновидности. Однако эти группы и отдельные конгломераты в них продолжают оставаться связанными с единой классификацией ИСК общей теорией, общими закономерностями оптимальных структур.

Создание новых строительных конгломератов основывается на открытых закономерностях, количество которых возрастает по мере развития строительного материаловедения как фундаментальной науки прикладного характера. Оно осуществляется по определенной системе, в которой исходные положения прогнозирования сочетаются с новыми экспериментальными исследованиями. Среди основных положений прогнозирования следующие:

всегда неизбежен качественный скачок к оптимальной структуре конгломерата и переход, через экстремум показателей свойств по мере количественного накопления дисперсионной среды в системе с переходом ее из дискретного в континуальное пленочное состояние на поверхности твердой фазы;

оптимальная структура конгломерата возможна при любом заполнителе, хотя наиболее экономичными и технически рациональными являются составы с максимальной плотностью упаковки его частиц и, следовательно, с наименьшим расходом вяжущего вещества в конгломерате;

с достаточной степенью приближения к истине целесообразно принимать, что линия оптимальных структур конгломератов на графике $R(c/f)$ описывается гиперболической зависимостью $y = a/x^b$, в которой все члены имеют строго определенный физический смысл;

вдоль кривой оптимальных структур размещается бесчисленное множество створов с наиболее благоприятным комплексом показателей строительных и эксплуатационных свойств. Проектирование состава позволяет выбрать один или несколько рациональных по технико-экономическим показателям;

самой наглядной и полной формулой прочности ИСК оптимальной структуры является (3.6). В ней нашли отражение практически все его структурные элементы в их теснейшей взаимосвязи.

Постадийное осуществление творческого процесса создания новых видов ИСК заключается в следующем.

Первая стадия включает детальное изучение вероятного вяжущего вещества. Для этого вначале потребуется установить главные технические требования к конгломератному материалу с тем, чтобы он обеспечивал надежность и долговечность изготавливаемой из него конструкции в эксплуатационный период. По комплексу показателей конгломерата судят в первом приближении о необходимых свойствах вяжущего вещества как будущей матричной части и выбирают наиболее подходящее вяжущее из числа традиционных. Важно учесть характер эксплуатационных условий работы конгломерата в конструкции. Часто именно от этих условий зависит выбор неорганического или органического вяжущего вещества с последующим уточнением их конкретной разновидности из числа традиционных.

Сложнее тот случай, когда при разработке нового ИСК не имеется в наличии традиционного вяжущего вещества и приходится ориентироваться на его получение по аналогии с традиционными технологиями или вовсе оригинального продукта и т. п. С помощью лабораторных испытаний изучаются с разной степенью полноты (от прикидочных до уточненных) свойства создаваемых композиций по некоторым условно

принятым технологиям с последующим их корректированием. Постепенным увеличением базового отношения c/f достигают экстремального значения требуемого (ключевого) свойства, ранее принятого для конгломерата. Если определяющими свойствами конгломерата являются прочность и какое-либо другое свойство, например теплосоппротивление, то выясняются показатели обоих свойств вяжущего. При необходимости понижения теплопередачи можно предусмотреть использование поризующих средств, но с учетом допустимого снижения прочности вяжущего (его расчетной активности при оптимальной структуре). Если важно сохранить в определенных пределах обратимые деформации — упругие и упруго-вязкие (эластические), то эти свойства вяжущего также изучают при оптимальной структуре. Процесс изучения сырья для вяжущего основывается на законах створа и конгруэнции свойств. Необходимые средства улучшения ключевых показателей качества — введение дополнительных ингредиентов, катализаторов, отвердителей, соединение с традиционными вяжущими веществами, использование технологических приемов (измельчение, механико-химическая обработка, тепловая обработка, перемешивание и др.). Далее выясняют отдельные детали технологии изготовления вяжущего вещества, предлагают методы оценки его качества, сходные с принятыми при оценке конгломератов.

На второй стадии создания нового строительного конгломерата определяют возможную разновидность заполнителя, что также обусловлено сырьевыми ресурсами, проектными требованиями к свойствам ИСК, разновидностью вяжущего вещества (порошкообразный, компаунд, расплав и т. п.) и уровнем его вероятной адгезионной способности по отношению к предполагаемому заполнителю. Устанавливают рациональный род заполнителя — минеральный или органический, порошкообразный, зернистый или волокнистый, тяжелый, плотный или легкий, пористый. Учитывают также другие возможные пожелания к качеству; цвет — при изготовлении конгломератного материала для отделочных штукатурок, теплопроводность — при изготовлении теплоизоляционно-конструктивного материала и т. п. Одновременно решают вопрос о целесообразных форме и размере частиц заполнителя, плотности заполняющей смеси.

Наиболее экономичными являются, как отмечалось, составы с максимальной плотностью упаковки плотных или пористых частиц заполнителя и, следовательно, с наименьшим расходом вяжущего вещества. Этот принцип приобретает тем большее значение, чем ближе оптимальная структура к контактной. Вместе с тем максимальная плотность не может быть самоцелью, а должна назначаться в совокупности с экономическими подсчетами, с учетом фазового отношения вяжущего вещества (с его увеличением целесообразно повышение количества мелкозернистой фракции в заполнителе), наличием материалов и т. п.

Вопрос о минимально допустимой прочности заполнителя также решается с позиций общей теории¹. Его актуальность возрастает по мере снижения прочности заполнителя по сравнению с прочностью создаваемого ИСК. При решении вопроса о минимальной прочности камня как заполнителя принимают во внимание релаксационный процесс, который тем эффективнее снижает внутреннее напряженное состояние, чем меньше период релаксации матричного материала. И тогда появляется дополнительная возможность снижения минимально допустимой прочности камня, используемого для изготовления заполнителя. Период или время релаксации матричного вещества оценивается при соответственных условиях, т. е. при оптимальных структурах и

¹ Рыбьев И.А., Скрыльников Д.К. О минимально допустимой прочности каменного материала, применяемого в асфальтовом бетоне // Изв. ВУЗов. Разд. Строительство и архитектура. Новосибирск. 1972, вып. 5.

Рыбьев И.А., Голованова Л.В. Релаксация напряжений в асфальтобетоне оптимальной структуры // Изв. ВУЗов. Разд. Строительство и архитектура. Новосибирск. 1974, вып. 10.

отрицательной температуре, наиболее часто наблюдаемой в эксплуатационном районе сооружения.

Исследования заполняющей, части конгломерата проводят с учетом следующих требований: удешевления продукции, облегчения конструкций (если допускают эксплуатационные условия), понижения однородности заполнителя и конгломерата, увеличения долговечности конструкций и сооружений.

На завершающей стадии в системе «свойства конгломерата — с/ф (или какой-либо иной структурный фактор)» строят график пучка кривых оптимальных составов, в которых были использованы принятые вяжущее вещество и разновидности заполнителя. Из пучка кривых непосредственно или по минимальному значению показателя степени n в формуле (3.3) следует целесообразность выбора заполняющего материала.

На третьей стадии создания нового строительного конгломерата устанавливают возможный рациональный состав', при котором структура во всех своих частях остается не только единой, монолитной, но и поддерживает необходимые технические показатели на должном и притом экстремальном уровне. Для этих целей используют общий метод проектирования, изложенный выше.

Четвертая стадия посвящена детальной отработке технологических операций, параметров и режимов. На этой же стадии проводят опыты по изготовлению вяжущего и конгломерата в полупромышленных условиях, а после получения определенного количества нового материала применяют его в строительстве. За поведением конгломератного материала устанавливают технический контроль и длительные наблюдения, внося, при необходимости, текущие коррективы.

3.7. ОЦЕНКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСК ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Комплекс наиболее благоприятных показателей строительных и эксплуатационных свойств (закон створа) ИСК оптимальной структуры обеспечивает не только более продолжительные сроки их надежной работы в конструкциях, но и более высокие показатели экономической эффективности по сравнению с конгломератами, структура которых не оптимальна. Надежность и повышенная долговечность конгломератов оптимальной структуры в конструкциях обусловлена устойчивыми свойствами морозостойкости, водостойкости, воздухоустойкости, которые каждый раз отмечаются в экспериментальных исследованиях таких материалов. Максимальная экономическая эффективность конгломератов оптимальной структуры устанавливается расчетными данными, в частности, путем сравнения приведенных затрат при оптимальной и неоптимальной структурах.

Экономическая эффективность конгломерата, изготовленного в заводских условиях, оценивается величиной приведенных затрат на единицу продукции, выраженной в рублях:

$$П = С + ЕК + Э, (3.17)$$

где $П$ — приведенные затраты, руб.; $С$ — себестоимость годовой продукции на заводе; $Е$ — нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; так как окупаемость капиталовложений принимается в 8 лет, то нормативный коэффициент $Е = 1/8 = 0,125$; $К$ — удельные капиталовложения в заводское производство конгломерата равные сумме капвложений, отнесенной к объему выпускаемой продукции в год, руб.; $Э$ — среднегодовые эксплуатационно-ремонтные расходы по поддержанию конгломератного материала и конструкции из него в нормальном состоянии.

Понятно, что чем меньше приведенные затраты, тем выше экономическая эффективность производства конгломерата и конструкций из него. При сравнении же экономической эффективности последняя тем больше, чем выше разность между $П_1$ и $П_2$, умноженная на объем выпускаемой продукции заводом в год (A), т. е. $A(П_1 - П_2)$ где $П_1$ — приведенные затраты конгломерата неоптимальной структуры и $П_2$ — то же, при оптимальной структуре конгломерата.

Если в обоих случаях (оптимальной и неоптимальной структур данного конгломерата) слагаемое $ЕК$ в формуле (3.17) является величиной постоянной, то экономическая эффективность $ЭЭ$ выразится:

$$ЭЭ = A(C_1 - Э_1) - (C_2 + Э_2),$$

где C_1 и $Э_1$ относятся к неоптимальным, а C_2 и $Э_2$ структурам конгломерата.

Величины себестоимости продукции (C) функционально связаны в основном с амортизацией основных фондов, стоимостью сырья, затратами энергии, топлива и др. В данном случае при сравнении себестоимостей C_1 и C_2 основное значение имеет стоимость затрачиваемых материалов, в первую очередь вяжущих веществ как наиболее дорогих компонентов. Другие факторы, влияющие на величину себестоимости, или практически остаются постоянными при сравнении C_1 и C_2 , или непосредственно связаны с расходом и стоимостью материалов, например стоимостью сырья. Очевидно, что чем ниже оказывается расход и стоимость применяемых материалов, тем ниже расход и стоимость сырья, на основе которого вырабатываются эти материалы.

Между тем анализ показывает, что наиболее экономными составами по расходу вяжущих веществ являются оптимальные, при которых конгломерат удовлетворяет закону створа. На рис. 3.16 показаны один оптимальный в точке H и ряд неоптимальных в точках A, B, C, D, E составов конгломерата, изготовляемого из принятых материалов — вяжущего вещества и заполнителей и при принятой технологии. Независимо от структур во всех указанных точках составы удовлетворяют величине заданного свойства, например пределу прочности при сжатии (R_{mp}). Однако составы отличаются тем, что в точке A содержится наименьшее количество вяжущей части и вяжущего вещества. Полагая, что

вяжущая часть дорожке заполняющей, очевидно, что и себестоимость C_1 при принятых выше условиях больше себестоимости C_2 , причем разность между ними быстро возрастает по мере удаления принятого состава от состава в точке Я. Аналогичное явление характерно при любых других свойствах, принятых в качестве критериев для оценки качества конгломерата.

Величины эксплуатационно-ремонтных расходов (Ξ) обусловлены в первую очередь долговечностью и надежностью материала в конструкций. Чем выше долговечность и надежность конгломерата, тем реже требуются ремонтные работы и ниже будут эксплуатационные расходы на поддержание конструкции в нормальном состоянии.

Между тем из рис. 3.16 видно, что структуры конгломерата в точках А, В, Е характеризуются дискретностью вяжущей прослойки и повышенной пористостью, вызванной недоуплотненностью конгломерата. То и другое всегда приводит к преждевременному разрушению структуры, особенно под влиянием циклического замораживания материала, насыщающегося водой. В тех случаях, когда требуется повышенная пористость конгломерата (снижение массы конструкции, повышение теплозащитных качеств и т. п.), целесообразно сохранять оптимальную плотную структуру, но использовать легкие пористые заполнители, поризовать вяжущую часть и даже иногда повышать содержание жидкой среды в пределах оптимальной структуры или, наоборот, вводить в смесь пластификатор (суперпластификатор) с тем, чтобы сократить расход жидкостной среды. Следовательно, в точке Н структура обеспечивает наибольшую долговечность конгломерата, наименьшие эксплуатационно-ремонтные расходы по сравнению со структурой в точках А, В, Е. В точках С, Д, Л структуры конгломерата характеризуются повышенной пористостью за счет испарения части жидкой среды в эксплуатационный период или частичного синерезиса с выпотеванием на поверхности изделий или конструкций. Повышенное отношение с/ф способствует появлению и развитию пластических деформаций, ускоряя потребность в ремонтных работах и дополнительных эксплуатационных расходах.

Таким образом, анализ показывает, что при неоптимальных структурах значения C_1 и Ξ_1 растут тем быстрее и в больших размерах, чем дальше отстоит структура конгломерата от оптимальной. Значения же C_2 и Ξ_2 всегда ниже, чем обеспечивается определенная экономическая эффективность при оптимальных структурах конгломерата. Однако следует учитывать, что при стоимости вяжущих веществ ниже стоимости заполнителя величина $\Xi\Xi$ также несколько уменьшается, что может быть установлено только с помощью конкретных расчетных данных.

Выше, при сравнении приведенных затрат, было принято что слагаемое ЕК в формуле (3.17) является величиной постоянной при оптимальной и неоптимальной структурах материала. Однако в реальных условиях оптимальные структуры могут оказать положительное влияние на рост производительности завода и увеличение выпуска продукции в единицу времени. Это вызовет снижение удельных капиталовложений в заводское производство конгломерата, а поэтому уменьшатся и приведенные затраты, возрастет соответственно экономическая эффективность.

На основании изложенного становится ясным, почему показатель наибольшей экономической эффективности размещается в виде экстремума в общем створе технических (строительно-эксплуатационных) свойств конгломерата оптимальной структуры. Комплекс экстремумов технических свойств становится как бы взаимно связанным с максимумом экономической эффективности, и в этом заключается одно из существенных достоинств оптимальных структур в строительном материаловедении.

4.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

ИСК, применяемые в конструкциях зданий и сооружений, изготавливают в сравнительно короткие технологические сроки. Они весьма малы по сравнению с многолетней продолжительностью работы зданий и сооружений, если даже еще и присовокупить срок хранения конструкций на складах, т. е. учитывать полный предэксплуатационный период. Он и тогда остается ничтожно малым, и поэтому нецелесообразно включать его в определяемую величину долговечности. Значительно важнее к моменту передачи конструкций в эксплуатацию обеспечить состояние ИСК на уровне, отвечающем требованиям высшего качества готовой продукции. В этом отношении предэксплуатационный период относится к важнейшим, непосредственно влияющим на долговечность зданий и сооружений или их элементов. Качественные характеристики готовой продукции, приобретаемые в результате технологической переработки сырья, служат исходными характеристиками, претерпевающими последующие изменения в эксплуатационный период до критического размера. И чем прогрессивнее была технология при переработке сырья, тем выше, как правило, становятся и исходные качественные показатели ко времени передачи объекта в эксплуатацию. От этого момента времени начинается отсчет периода, именуемого долговечностью. Свойство долговечности, как отмечалось выше, относится к комплексной характеристике качества ИСК и выражается в их способности сопротивляться сложному воздействию внешних и внутренних факторов, проявляющихся в эксплуатационный период работы конструкции. О долговечности судят по продолжительности изменения до критических размеров прочности или деформационной устойчивости как ключевых свойств в отношении данной конструкции здания или сооружения. С этой целью по образцам, отобранным из конструкции для испытания в лабораторных условиях или адеструктивными методами, определяют показатели свойств, устанавливают величины отклонений числовых значений свойств от первоначальных. Получаемые результаты сравнивают с предельно допустимой величиной их изменения.

Периодически производимая оценка изменения качества не является, однако, безупречной. Первичной характеристикой материала является не качество, а его структура и размеры ее изменения, особенно по сравнению с первоначальной — оптимальной, зафиксированной в предэксплуатационный период. Поэтому в общей теории ИСК под долговечностью понимают способность материала в течение определенного времени сохранять на допустимом уровне структурные параметры, сложившиеся в технологический период. Если они соответствуют параметрам оптимальной структуры, то устанавливается взаимосвязь между структурными параметрами и экстремальными показателями свойств (закон створа). И тогда оценка долговечности ИСК по изменению структуры с помощью стереологических методов становится адекватной измерению изменений качественных показателей с помощью физико-механических и физико-химических испытаний. Учитывая, что проще и доступнее определять качественные показатели, чем структурные параметры, целесообразно к ним переходить, когда имеется оптимальная структура. Полезно время от времени сверять результаты измерения качества с изменениями в оптимальной структуре.

4.2. ВРЕМЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАТЕРИАЛА

Независимо от способа оценки — по изменению свойств или по отклонению структурных параметров от оптимальных — полный период долговечности начинается от момента вступления материала к выполнению своих функций в конструкции до предельно допустимого (критического) уровня соответствующего изменения свойств или структуры. Целый период долговечности условно можно разделить на три этапа или временных элемента (рис. 4.1). Как отмечалось, до начала первого этапа имеется еще предэксплуатационный период, который в основном характеризуется набором и формированием структурных элементов и свойств в технологическом процессе. Однако он относительно кратковременный, хотя при длительном хранении готовой продукции в складских помещениях и, тем более, на открытых площадках строительных объектов, возможны изменения приобретенных в технологический период показателей свойств и структуры. При особо неблагоприятных условиях хранения отдельных изделий потребуются внести коррективы в первоначальную оценку качества или структуры перед отправлением их по назначению.

Первый этап долговечности характеризуется упрочнением структуры или улучшением показателей свойств; второй — их относительной стабильностью; третий — деструкцией, т. е. медленным или быстрым нарушением структуры вплоть до ее критического состояния или даже до полного разрушения. У отдельных материалов тот или иной этап в периоде долговечности может отсутствовать, или его продолжительность практически приниматься равной нулю. Может, например, полностью отсутствовать временной элемент упрочнения структуры или ее стабильного состояния. Что же касается этапа деструкции, то он почти неизбежен, хотя и не всегда наблюдается визуально. Гораздо реже деструкция протекает с огромной интенсивностью, когда временной элемент становится равным нулю.

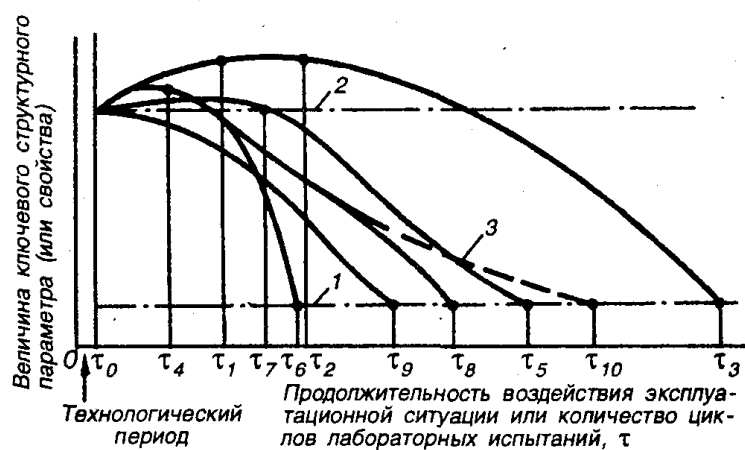


Рис. 4.1. Схема чередования временных элементов долговечности в эксплуатационный период 1 — уровень предельных (критических) значений ключевого структурного параметра; 2 — предэксплуатационный уровень ключевых структурных параметров; 3 — увеличение продолжительности τ_3 торможением деструкции до τ_{10}

Задача технологов и строителей заключается в том, чтобы всемерно увеличить долговечность конструкции и, следовательно, образующего ее конгломерата. Эта задача адекватна продлению продолжительности каждого из трех взаимосвязанных временных элементов, особенно этапов упрочнения и стабильности структуры, добиваясь вместе с тем эффективного торможения и удлинения срока деструктивных процессов.

Сущность упрочнения структуры на первом этапе долговечности заключается в том, что под влиянием внешней среды, нагрузок, инверсии фаз и т. п. в эксплуатационный период в материале, особенно в вяжущей части, а также в контактных зонах, возникают вначале

на микроуровне, а со временем укрупняются новые (вторичные) структурные центры. Совместно с теми, которые возникли на ранней стадии формирования структуры (первичными), они участвуют в дополнительном процессе уплотнения структуры с увеличением концентрации той части твердой фазы, которая является основным носителем эффекта упрочнения. В результате не только наблюдается упрочнение структуры и рост прочности материала по отношению к механическим нагрузкам, но и улучшение некоторых других его свойств. Примером материала с упрочнением структуры в эксплуатационный период может служить цементный бетон и его вяжущая (матричная) часть в виде цементного камня при контакте с водной средой и тем более с щавелевой кислотой. Последняя, проникая в поры, образует малорастворимые соли и плотные продукты с очень низкой диффузионной проницаемостью. Особенно часто эффект упрочнения наблюдается в связи с уплотнением новообразований при взаимодействии углекислого газа с известью в материале; переходом аморфного вещества в кристаллическое. Однако упрочнение структуры в эксплуатационный период может составить только тогда положительный эффект, если оно не явилось следствием так называемого «старения». Под последним понимается нередко наблюдаемое явление охрупчивания конгломератов на основе полимеров за счет химических реакций, или при рекристаллизации с увеличением в объеме новообразований. Старение переводит материал в состояние хрупкого микротрещинообразования и, в конечном итоге, резкого сокращения долговечности.

Второй этап — стабилизация структуры — характеризуется сравнительно неизменной концентрацией структурных элементов в единице объема материала и относительным постоянством показателей свойств. Уровень этих показателей имеет колебания за счет местных процессов упрочнения и деструкции, например за счет кристаллизационных напряжений или агрессии внешней среды. Однако в целом сохраняется их сбалансированность на некотором среднем, стабильном уровне (см. рис. 4.1). Впрочем, явления деструкции распространяются и на первый этап упрочнения, но тогда силы разупрочнения сравнительно малы и суммарный эффект остается позитивным.

Третий этап долговечности — деструкция — самый типичный процесс эксплуатационного периода. Он может начаться с первого же этапа эксплуатации конструкции, но может следовать также за упрочнением и стабилизацией структуры. Третий этап характеризуется нарушением структуры с возможной потерей ее сплошности постепенным накоплением разрывов межатомных связей. Разрывы возникают под влиянием ускорения теплового движения атомов и молекул, развития механических, усадочных, осмотических и иных напряжений. Установлено, что процесс постепенного повреждения структуры сопутствует каждой, даже самой малой упругой деформации.

Кроме физических, в период деструкции протекают химические и физико-химические процессы, которые именуют как коррозионные. В широком смысле коррозия означает разъедание металла или другого материала под влиянием контакта с внешней агрессивной средой, проникания ее в поры и капилляры. Процессы коррозии усиливаются при одновременном воздействии физических факторов, если, например, материал находится в напряженном состоянии под влиянием растягивающих или сжимающих усилий, или если вместе с агрессивной средой, например жидкой, материал подвержен воздействию отрицательных температур с циклическим замерзанием и оттаиванием жидкой среды в порах. На заключительной стадии деструкция переходит в интенсивный и даже лавинный процесс образования опасных микро- и макротрещин, завершается частичным или полным разрушением конгломерата.

Определение и изучение долговечности и составляющих ее временных элементов производится на разных уровнях структуры — от молекулярной и надмолекулярной до макроскопической, причем всегда целесообразно начинать с характеристики структуры, а затем переходить к показателям свойств. Но они тесно взаимосвязаны, а при оптимальных структурах между ними имеются закономерные связи.

При изучении состояния структур во времени обычно выбирают наиболее значимые (ключевые) характеристики. Количественной оценкой структур занимается стереология; ее методы используют и для изучения долговечности ИСК. Эти методы позволяют по плоскостным микрофотоснимкам или другим данным структурного анализа определять объемное содержание изучаемых элементов и количественные изменения в эксплуатационный период: размер и объем пор, величину внутренней удельной поверхности твердой фазы, размер твердых частиц, толщину прослоек жидкой среды, соотношения объемов или масс кристаллической и аморфной (стекловатой) частей в вяжущем, однородность в расположении ключевых частиц в определенных объемах и т. п.

4.3. КРИТИЧЕСКИЕ УРОВНИ КЛЮЧЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Основные, или ключевые, характеристики свойств и структуры имеют, как уже отмечалось, критические уровни, переход за пределы которых сопряжен со сравнительно интенсивным разрушением материала или срочным капитальным ремонтом конструкции. Критические уровни устанавливаются для каждого ИСК в конструкции. При выборе критических уровней ключевых показателей свойств ориентируются на требования действующих стандартов и строительных норм. В них указаны, как правило, числовые показатели технических свойств материала и допустимые пределы их изменения в эксплуатационный период. Для некоторых материалов могут быть приняты не один, а два, три или большее количество числовых показателей ключевых свойств или иных характеристик. Для каждого показателя устанавливают свой предельный уровень допустимого изменения. При эксплуатации конструкции весьма важно, чтобы наблюдалось всемерное увеличение периода времени до момента, когда ключевой показатель (или несколько принятых ключевых показателей) окажется на уровне допустимого изменения. Соответствующий период времени выражает долговечность материала, поскольку дальнейшая эксплуатация конструкции недопустима без проведения капитального ремонта.

Аналогичный метод оценки долговечности производится и по структурным параметрам. Ключевые структурные показатели непосредственно отражают уровень внутренних изменений в материале под влиянием эксплуатационных факторов.

Эти изменения относятся к отклонениям от первоначально зафиксированных размеров ключевых структурных характеристик. Вследствие отклонений возможно нарушение оптимальных структур с частичной потерей ранее установленных технических свойств, пока отсутствуют какие-либо нормы в отношении допустимых количественных изменений в структуре. На определение структурных характеристик материалов имеется ГОСТ 22023—76 «Материалы строительные. Метод микроскопического количественного анализа». Допустимый уровень изменений в структуре устанавливают путем предварительного совместного изучения структурных и качественных характеристик материала оптимальной структуры и их сопоставления между собой. Появление микро- и макротрещин, увеличение пористости или ее резкое снижение, отслаивание контактной зоны, шелушение или выкрашивание, дислокационные нарушения в структуре и текстуре и другие дефекты являются существенными признаками внутренних структурных и качественных изменений, возникших в материале под влиянием эксплуатационных факторов. С их появлением возникает необходимость тщательного наблюдения за дальнейшим состоянием конструкций с принятием мер по своевременному их ремонту.

Среди типичных эксплуатационных факторов, оказывающих как правило, негативное влияние на состояние строительных конструкций и материалов, можно выделить: механические — воздействие внешних нагрузок различной величины и интенсивности статического и динамического характера, а также массы материала и конструкций; температурные — воздействие устойчивой температуры и ее колебаний в конструкциях зданий и сооружений; воздушную и газовую среду с содержанием в ней углекислого газа, пара, пыли и других примесей; водную среду с широкими пределами ее агрессивности; кислоты, щелочи, солевые растворы разных концентраций и другие жидкие среды, например растительные масла, нефтепродукты и т. п., которые имеют различную степень агрессивности по отношению к материалу; климатические, к которым, кроме упомянутых выше факторов, относятся также солнечная радиация, ветер, влажность воздуха; воздействие некоторых других возможных физических факторов — электрического поля и тока, излучения, электромагнитного поля и т. п. Кроме того, нередко на структурные и качественные изменения влияют спонтанные негативные явления в материале.

Большую разрушительную активность по отношению к строительным материалам и конструкциям проявляют животные и растительные микроорганизмы и их производные — органогенные агрессивные среды. Академик В.И. Вернадский утверждал, что на земной поверхности не имеется химической среды более постоянно действующей, а потому и более могущественной по своим разрушающим последствиям, чем растительные и животные микро- и макроорганизмы. До 15—20% всего ущерба, который наносит коррозия, вызывается микроорганизмами. В этих средах весьма целесообразно оценивать предельное состояние ИСК в конструкциях ключевым показателем химической стойкости, например по привесу новообразований в агрессивной среде, изменению водородного показателя pH во времени и др.

В реальных условиях на конструкцию и ее материал воздействует комплекс из двух или большего количества эксплуатационных факторов. Эффект от воздействия такого комплекса значительно сложнее, чем от каждого фактора в отдельности или даже после их суммирования. Совместное воздействие активных сред и механических напряжений приводит к интенсификации деструкции и, в частности, коррозионных процессов. Под влиянием деструкции от совместного воздействия прочность, например, снижается в больших размерах, чем суммарное уменьшение ее под влиянием внешней нагрузки, минерализованных вод, циклического замораживания. То же наблюдается при совмещении воздействия агрессивной среды с попеременным замораживанием и оттаиванием. Следует отметить, что различного вида природными и производственными агрессивными средами повреждается от 15 до 75% всех строительных конструкций зданий и сооружений.

Ниже (см. 9.4, 10.4, 11.6) рассмотрены примеры воздействия некоторых внешних факторов и агрессивных сред на наиболее типичные ИСК — цементные бетоны, асфальтобетоны и полимербетоны. Здесь же важно отметить, что долговечность может быть с некоторым приближением определена теоретическим методом, что позволяет ее прогнозировать. Более точное прогнозирование долговечности осуществляется при сочетании теоретического расчета и экспериментальных данных.

4.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРИНЯТЫЕ В НИХ ОГРАНИЧЕНИЯ

Согласно закону конгруэнции, между вяжущим веществом и конгломератом на его основе существует при оптимальных структурах обязательное соответствие свойств. Обеспечение условий, при которых создается необходимая долговечность вяжущего вещества оптимальной структуры, в значительной мере предreshает задачу обеспечения долговечности самого конгломерата. И хотя присутствие в ИСК, кроме вяжущего, других структурных элементов (заполнителя, контактной зоны, пор и др.) вносит свои коррективы, иногда значительные, в долговечность, все же эти коррективы принципиально не изменяют характер основной зависимости между долговечностью ИСК и его вяжущей частью при оптимальных структурах. Для строительных конгломератов эта зависимость может быть выражена формулой:

$$\tau_{T,\sigma} = \tau_{T,\sigma}^* / x_n, \quad (4.1)$$

где $\tau_{T,\sigma}$ — долговечность конгломерата оптимальной структуры, определенная при температуре T и напряжении σ ; $\tau_{T,\sigma}^*$ — долговечность вяжущего вещества оптимальной структуры при тех же условиях ее определения, что и конгломераты; x — отношение фазовых отношений в вяжущем веществе ИСК и в вяжущем веществе оптимальной структуры, т. е. $(c/f)/(c^*/f)$; n — комплексный показатель степени, отражающий нелинейность зависимости долговечности от фазового отношения вяжущего вещества в конгломерате и обусловленный разновидностью и характеристикой заполнителя, а при отсутствии его — величиной поверхности раздела фаз; как правило, показатель n является положительной величиной и, следовательно, $\tau < \tau^*$.

Долговечность вяжущего вещества τ^* как микродисперсной матричной части конгломерата может быть выражена на участке кривой 3 (рис. 4.1) формулой, принятой в кинетической теории прочности и развитой в работах С.Н. Журкова:

$$\tau^* = \tau_0 \cdot e^{\frac{u_0 - \gamma\sigma_t}{kT}}, \quad (4.2)$$

где τ_0 — кинетическая постоянная, характеризующая материал; γ — структурный коэффициент (кДж/моль·МПа); σ_t — расчетное напряжение при температуре t , МПа; k — постоянная Больцмана, как отношение универсальной постоянной к числу Авогадро: $k = R/N_A$; T — абсолютная температура по шкале К; τ_0 , u_0 , γ — постоянные величины, зависящие от природы и структуры материала.

Числитель экспоненты $u_0 - \gamma\sigma_t$ имеет размерность энергии и называется энергией активизации процесса разрушения, обозначаемой u . Поэтому можно записать:

$$\tau^* = \tau_0 \cdot e^{u/kT} \quad (4.3)$$

или нередко формулу (4.3) записывают в виде:

$$\tau^* = A \cdot e^{-\beta\sigma_t}, \quad (4.4)$$

Подставляя то или иное выражение τ^* в формулу (4.1) долговечности конгломерата, можно написать, что

$$\tau_{T,\sigma} = \frac{\tau_0 \cdot e^{u/kT}}{x^n} \quad (4.5)$$

или, что то же,

$$\tau_{T,\sigma} = \frac{A \cdot e^{-\beta\sigma}}{x^n}. \quad (4.6)$$

Формулы (4.5) и (4.6) долговечности учитывают действие только механических напряжений — от момента нагружения до момента разрыва материала, но не учитывают

воздействия агрессивной среды¹. Они не учитывают также возможного упрочнения и стабилизации структуры в эксплуатационный период, поэтому остаются пока недостаточно полными.

¹ *Патуроев В.В., Соловьев Г.К. Устойчивость полимерных бетонов. ФИП. 78 Eighth Congress, ProceeDyноjs: Pariti, 1978.*

4.5. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ МАТЕРИАЛА В КОНСТРУКЦИЯХ

Более широким и емким свойством ИСК и качеством конструкций из них, чем долговечность, является надежность. Она тоже выражает комплексное свойство материала или системы, но содержит в своей характеристике большее количество критериев: безотказность, сохраняемость, долговечность и ремонтпригодность.

Безотказность — свойство конгломерата (системы) сохранять работоспособность в течение определенного или возможно более длительного времени без вынужденных перерывов на ремонт, или замену забракованного в конструкциях изделия и т.д. Показателем этого свойства служит вероятность безотказной работы материала, оцениваемой числовой величиной возможности появления случайного обстоятельства (события) с нарушением безотказности работы. Отказом называют потерю работоспособности материала (системы) вследствие недопустимого изменения структуры и свойств под влиянием внешних воздействий и внутренних процессов.

Сохраняемость — свойство конгломерата (системы) сохранять приданные ему в технологический период качественные характеристики на стадиях хранения, транспортирования и последующего времени, обусловленного технической документацией. Это свойство количественно оценивается продолжительностью хранения и транспортирования до возникновения неисправности.

Долговечность — комплексное свойство, количественно выражаемое продолжительностью эффективного сопротивления сложному воздействию внешних и внутренних факторов в эксплуатационный период работы материала (см. 4.1) до соответствующего критического уровня.

Ремонтпригодность — свойство материала, выражающееся в способности к восстановлению неисправности, обнаруженной вследствие отказа. Показателем ремонтпригодности служит средняя продолжительность ремонта на один отказ данного вида, а также трудоемкость и стоимость устранения случайных дефектов, приведших к отказу.

С теоретических позиций за основной исходный принцип надежности ИСК принимают оптимальную структуру при условии правильно принятых компонентов, технологических параметров и режимов. Оптимальная структура, созданная с учетом эксплуатационных условий работы материала в конструкции, обеспечивает формирование повышенного ресурса как меры вероятности пребывания материала (системы) в безотказном состоянии: чем полнее прошла оптимизация структуры, тем выше ресурс; чем дальше реальная структура находится от оптимальной, тем меньшим ресурсом обладает ИСК, выше вероятность и ближе появление отказа.

Одним из числовых критериев оптимальных структур, как было показано выше, служит величина A в уравнении (3.15). Если $A = 1$, то структура — оптимальная, параметр A становится индикатором подобию, интенсивность отказов — наименьшая и равна λ_0 , время между двумя соседними отказами — наибольшее и равно $\tau_0 = 1/\lambda_0$. Если $A \neq 1$, то структура — неоптимальная и поэтому интенсивность отказов λ нарастает тем в большей мере, чем дальше отстоит реальная структура от оптимальной по соответствующим критериям оптимальности. Время между двумя соседними отказами $\tau < \tau_0$ и с ростом интенсивности отказов быстро уменьшается, поскольку $\tau = 1/\lambda$. Таким образом, с увеличением или уменьшением индикатора A , по сравнению с его величиной, равной единице при оптимальной структуре, уменьшаются и ресурсы. Но вместе с тем следует учесть, что технологически полученная оптимальная структура в дальнейшем сохраняет тенденцию к непрерывному изменению под влиянием совокупности факторов, складывающихся при транспортировании, монтажных и других строительных работах и, главное, в эксплуатационный период с возможным проявлением временных элементов долговечности (см. 4.2), в том числе и упрочнения структуры, а следовательно, ростом ресурса, а также с деструкцией, т. е. снижением ресурса. В каждый данный момент

времени отмечается неустановившийся уровень ресурса и его колебания вплоть до вероятности первого отказа. По аналогии с принципами Л. Больцмана ($S = k \ln W$, где S — энтропия, W — термодинамическая вероятность, k — постоянная величина) можно, по-видимому, выразить и ресурс надежности: $r = \ln W$. Это следует после логарифмирования

уравнения $W = \exp \left[- \int_0^{\tau} r d\tau \right]$, справедливого для системы, сохраняющейся безотказной в

течение времени τ от момента начала его отсчета при $\tau = 0$.

Отсюда следует, что чем прогрессивнее технология или отдельные ее пределы в процессе производства ИСК, чем полнее использованы способы упрочнения и стабилизации структуры, торможения деструкционных явлений, чем больше структура приведена в состояние устойчивости и равновесности с меньшей сохранившейся внутренней и поверхностной свободной энергией, тем выше ресурс как функциональная мера надежности избежать первого и последующих отказов, т. е. выше безотказность, сохраняемость, долговечность конструкции, изготовленной из этого ИСК, применительно к данным эксплуатационным условиям.

И тем не менее, хотя ресурс и выступает в качестве функциональной меры надежности, он за больший или меньший период эксплуатации объекта под влиянием внешних и внутренних факторов, неучтенных в период прогнозирования, может достичь своего минимума. Последнее неизбежно приведет к необходимости срочного капитального ремонта строительного объекта, а возможно — и к разрушению объекта или отдельных его конструктивных элементов. Теория ИСК на данном этапе своего развития придерживается дилатонно-компрессионной теории деформирования и разрушения¹. Сущность ее в кратком изложении заключается в следующем.

Атомно-молекулярные частицы системы находятся во взаимосвязи и непрерывном движении. В этом атомно-молекулярном множестве внутренняя энергия распределена случайным образом. Если система представлена упорядоченной, оптимальной и даже кристаллической структурой, то и тогда возможны флуктуации значений энергии частиц. Значения флуктуации могут быть как меньше средней величины энергии частиц, т. е. отрицательное ее значение, называемое *дилатоном*, так и больше средней, т. е. положительное ее значение, называемое *компрессионом*. Воздействие на систему механических эксплуатационных факторов приводит к новому перераспределению внутренней энергии, к прогрессирующему размножению флуктуации обоих знаков, изменению энергетического уровня атомно-молекулярных частиц в системе, нарушению орбит движения, в том числе валентных электронов, порождению ангармоничности тепловых колебаний атомов твердого тела.

Атомы могут оказаться в двух принципиально различных критических положениях: дилатонном и компрессионном. Первое возникает при увеличении доли кинетической энергии за счет уменьшения потенциальной, что в конечном итоге завершается отрывом атома от узла кристаллической решетки, неограниченным возрастанием площади эллиптических орбит валентных электронов, отрывом их от своих атомов с выходом из твердых или жидких тел (электронная эмиссия). Второе положение достигается при преобразовании кинетической энергии в потенциальную. При этом энергетический уровень атома опускается, амплитуда ангармонических колебаний уменьшается, эллиптические орбиты валентных электронов вырождаются в круговые, атом теряет связь с ближайшим окружением. Если первое (дилатонное) критическое положение атома сопровождается появлением значительных внутренних усилий и микродеформированием с их переходом в дальнейшем на макроуровень (без механодеструкции), то второе (компрессионное) критическое положение сопровождается потерей связи между атомами,

¹ Комаровский А.А. Механизм разрушения бетона и перспективные меры обеспечения его долговечности. Киев. 1988.

особенно между теми их группами, которые характеризуются пониженной температурой и высокой плотностью, что может завершаться появлением микроразрушений, чему благоприятствуют и рядом расположенные дилатоны. Микродеформирование и микроразрушение с переходом в перспективе на макроскопический уровень находятся как бы в единстве, а разрушение под силовым воздействием внешних нагрузений системы имеет дилатонно-компрессионную природу. Достоверность такого механизма разрушения непосредственно следует из кинетического уравнения прочности (4.2)¹, поскольку τ_0 и τ — периоды финитного движения атомов в компрессионном состоянии и на любом другом энергетическом уровне.

¹ Журков С Н Дилатонный механизм прочности твердых тел // ФТТ. 1983, т. 25, № 10.

Элементы теории методов научного исследования и технического контроля качества

Теория методов научного исследования и технического контроля качества является четвертой частью общей теории искусственных строительных конгломератов. Она выражает совокупность приемов и операций в теоретическом познании качественных характеристик ИСК, закономерностей, лежащих в основе методов испытания материалов при оценке их свойств в лабораторных и производственных условиях разрушающими и адеструктивными способами, приборами, аппаратами и автоматизированными средствами.

Первичным познавательным процессом служит наблюдение, проводимое в необходимых случаях с применением измерительных средств. Получаемых сведений обычно достаточно, чтобы судить о качестве материала при сравнении их со стандартными или проектными требованиями. Этот познавательный процесс как первая ступень экспериментального исследования по своему существу адекватен техническому контролю качества.

Высокой ступенью познания структуры и свойств ИСК является эксперимент. Научная глубина эксперимента зависит в первую очередь от состояния теории. Получаемые новые экспериментальные данные как дополнительные факты используются при дальнейшем развитии теории или служат объективным критерием достоверности теоретических положений, средством доказательства правильности научных предположений (вероятных гипотез). «Науки, которые не родились из эксперимента, этой основы всех познаний, бесполезны и полны заблуждений» (Леонардо да Винчи).

Экспериментальные исследования ИСК производятся в основном с привлечением конкретных независимых методов¹. Для получения надежных и объективных результатов одновременно может применяться несколько независимых методов, соединяемых в комплексы. Выбор методов научного познания, объединения их при необходимости в комплексы и обобщение методов исследования составляют главное звено методологии в общей теории ИСК. Для разных конгломератов могут использоваться одинаковые или близкие между собой независимые методы и их комплексы, особенно когда экспериментальные исследования проводятся на одном уровне дисперсности частиц материалов или на одном масштабном или структурном уровне.

В теории методов научного исследования ИСК установлено пять масштабных уровней и соответственно пять классов комплексов независимых методов научного познания (табл. 5.1). В них сосредоточены объективные комплексы независимых методов научного познания и отдельные независимые методы (табл. 5.2), что составляет основу согласованного, или гармонического, применения качественных и количественных методов научного исследования. Другая закономерность в этой теории устанавливает взаимосвязанный и взаимообусловленный характер классов, комплексов, независимых методов научного познания и получаемой с их помощью научной информации о структурных уровнях и объектах исследования в целом. Реальные возможности этой закономерности в методологическом отношении наглядно показаны на рис. 5.1.

Таблица 5.1. Классы комплексов и масштабные уровни исследований

<i>Классы комплексов независимых методов</i>	<i>Масштабные уровни объекта изучения</i>	<i>Масштабы наблюдений</i>	<i>Пределы измерений, см</i>	<i>Объекты изучения</i>

¹ Рыбьев И.А., Нехорошее А.В. Исходные методические позиции при исследовании ИСК // Строительные материалы. 1980, № 2. С. 24—26.

<i>I</i>	Субмикроскопический (атомно-молекулярный)	Электронно-микроскопический	До 10^{-7}	Ядра, атомы, ионы, молекулы
<i>n</i>	Микроскопический (коллоидно-дисперсный)	Электронно-микроскопический и оптический	$10^{-7} — 10^{-5}$	Макромолекулы, кристаллиты, кристаллы, сферолиты; фазы и фазовые контакты, микропоры, микротрещины
<i>III</i>	Мезоскопический (пылевидные фракции)	Оптический	$10^{-5} — 0,014$	Глобулы цементного вещества, наполнители (пылевидные зерна), мезопоры, контактные зоны
<i>IV</i>	Макроскопический (песчаная фракция)	Оптический и визуальный	$0,014 — 0,5$	Прослойки, межпоровые перегородки, заполнители (песок), макропоры
<i>V</i>	Мегаскопический (гравийно-щебенистая фракция)	Визуальный	Свыше 0,5	Растворная часть, заполнители (гравий, щебень, мегапоры, трещины)

Таблица 5.2. Комплексы и независимые методы

Классы комплексов независимых методов				
<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III</i>	<i>IV</i>	<i>V</i>
Радиометрические, электронная микроскопия, рентгеновские, термические, оптические, химические и др.	Электронная микроскопия, рентгеновские, термические, оптические, химические, электрические и электрохимические, планиметрия и порометрии, реологические, дилатометрические, дефектоскопии и др.	Рентгеновские, термические, оптические, химические, электрические и электрохимические, планиметрия и порометрии, реологические, дилатометрии, дефектоскопии, седиментационного и гранулометрического анализов, физико-механических испытаний, тензометрии и др.	Оптические, химические, электрические и электрохимические, планиметрия и порометрии, реологические, дилатометрии, дефектоскопии, седиментационного и гранулометрического анализов, физико-механических испытаний, тензометрии, визуальных наблюдений, др.	Планиметрия и порометрии, реологические, дилатометрии, дефектоскопии, седиментационного и гранулометрического анализов, физико-механических испытаний, тензометрии, испытания стойкости, визуальных наблюдений, длительных испытаний под нагрузкой, и мегаскопия и др.

Выбор независимых методов, объединение их в классы и отбор в комплексы согласовывается с определением масштабного уровня объекта изучения. Выделяют его

существенные структурные характеристики и их влияние на ключевые свойства конгломерата. Устанавливают взаимосвязь и взаимозависимость между объектом, целью исследования и методами научного познания.

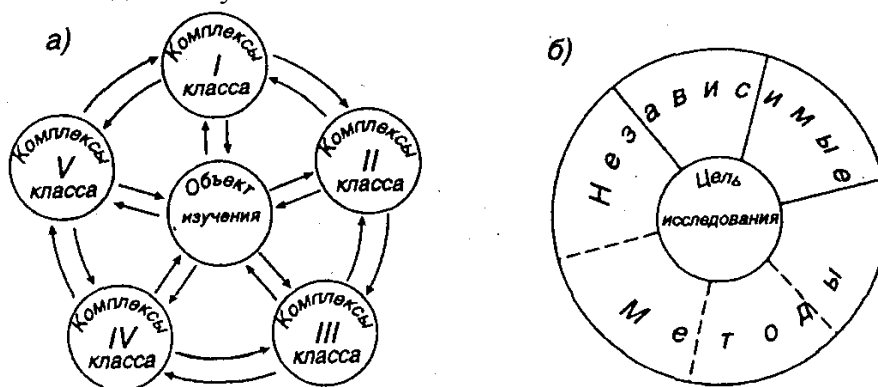


Рис. 5.1. Схема взаимосвязи и взаимозависимости:

а — между объектом изучения и методами научного познания (объект → структурный уровень → класс → комплексы); б — между целью исследования и методами научного познания (цель → комплекс → независимые методы)

Независимые методы познания могут быть прямые (например, оптические, микроскопические, электронно-микроскопические, рентгеновские) и косвенные (например, адсорбционные—для газов, пара, растворов, ртутной порометрии, капиллярной конденсации, проницаемости и др.). Из всех методов структурного исследования предпочтительнее, когда это возможно, пользоваться прямыми, хотя и встречаются трудности на некоторых уровнях исследования.

Для каждого структурного уровня выбирают свои классы, комплексы независимых методов, соответствующие явлениям и процессам, характерным для данного уровня, что обеспечивает наибольшую достоверность получаемых результатов исследования.

При разработке новых или совершенствовании традиционных методов и комплексов важно исходить не только из факторов, которые разделяют методы (цель исследования), но также из факторов, которые объединяют методы (объект и уровни исследования). На стадии экспериментальных работ предпочтение отдают комплексным методам, которые позволяют изучать как изменение свойств конгломерата, так и структурообразующие и деструкционные явления и процессы. При анализе результатов экспериментального изучения свойств ИСК устанавливают степень их соответствия закону створа и другим законам оптимальных структур. Последнее дополнительно позволяет убедиться в надежности и объективности принятых методов научного познания и их комплексов, а также в оптимальности структур ИСК.

Практическая значимость отмеченных выше закономерностей и правил применения объективных методов научного познания и их комплексов состоит еще и в том, что они позволяют совершенствовать известные и прогнозировать, разрабатывать новые методы исследования и технического контроля качества. Последнее составляет важную задачу общей теории ИСК и в целом строительного материаловедения. Теория методов научного исследования и технического контроля качества продолжает развиваться и совершенствоваться в направлении увеличения количества независимых методов и их комплексов, базирующихся не на условных, а на инвариантных характеристиках качества, находить более точные выражения в физическом и математическом моделировании технологий в лабораторных условиях и конгломератов со сходными (подобными) оптимальными структурами. Некоторые новые физические и физико-химические методы исследования служат и для технического контроля как в процессе изготовления, так и при оценке качества готовой продукции. Особенно полезными в технологиях материалов являются методы определения: удельной поверхности измельченных твердых материалов — порошков как наполнителей, цементов как вяжущих и др.; влияния поверхностно-

активных веществ на величину поверхностного натяжения на границе двух фаз, вводимых в систему с целью гидрофобизации, гидрофилизации, воздухововлечения, пластификации и т. п.; количества выделяемой теплоты при различных процессах (смачивания, адсорбции, твердения цемента, кристаллизации и других) с помощью микрокалориметров или других методов (термического, адиабатического, изотермического и пр.); структурно-механических свойств пластично-вязких систем с помощью пластометров, вискозиметров, сдвиговых приборов; кинетики схватывания и отвердевания материалов с использованием электрических и ультразвуковых методов и соответствующих им приборов; характеристик пористости строительных материалов различными методами — сорбционными, микроскопическими, ртутной порометрии, основанными на взаимодействии материала с жидкостями и газами, рентгенографическими, механическими. Каждый из этих методов имеет свои пределы измерения радиусов пор, как правило, в пределах 10^{-7} — 10^{-3} см.

Особым вниманием пользуются в строительном материаловедении адеструктивные методы измерений количественных показателей свойств изделий или образцов. Испытания не сопровождаются разрушением или нарушением структуры материала. Наиболее распространены акустические, комплексные, магнитные и электромагнитные, механические, радиометрические, рентгеновские и электрические методы. Они основаны на прямых и обратных зависимостях между физическими значениями, получаемыми при испытании неразрушающим прибором, и традиционными показателями свойств. Зависимости выражаются в виде формул, графиков, таблиц. С помощью этих методов определяют прочностные и деформативные показатели, модули упругости, среднюю плотность, влажность, фазовый состав; производят контроль качества и дефектоскопию. Измерения становятся более эффективными при комплексном использовании адеструктивных методов исследования с получением двух или нескольких физических характеристик.

В технологический и, особенно, в эксплуатационный периоды возникает необходимость в измерениях деформаций, вызываемых влиянием набухания, силовых, усадочных, температурных и других внешних и внутренних факторов с помощью оптических компараторов, индикаторов часового типа, дилатометров, тензометрических приборов, а также путем комбинирования различных методов и приборов; коррозионной стойкости к действию агрессивных сред в напряженном и свободном от напряжений состояниях. В целях сокращения сроков практикуются ускоренные физико-химические методы испытания морозостойкости, микротрещинообразования, определения тепловых и акустических характеристик и др.

6.1. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ И РАЗНОВИДНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Специфика производственной технологии заключается в ее конкретном предназначении и регламентации. Производственные технологии подразделяются по характеру выпускаемой продукции. Поскольку разновидностей строительных материалов и изделий насчитывается множество, то и количество соответствующих им специфических технологий также составляет весьма значительную величину. Некоторые виды продукции изготавливают по нескольким технологиям и за счет этого возможно превышение числа технологий над количеством этой продукции. Но на практике возможно и уменьшение числа технологий в связи с выпуском по одной технологии нескольких разновидностей продукции.

Более широкое обобщение производственных технологий позволяет разделить их всего на две группы. К одной группе относятся технологии, в которых четко представлена физико-механическая переработка сырья. К другой группе относятся технологии в промышленности строительных материалов с четко выраженной химической переработкой сырья; чаще их называют химическими технологиями.

Еще более полно обобщение производственных технологий с объединением их как бы в единую технологическую систему возможно на базе ограниченного числа основополагающих элементов. К последним могут быть отнесены три главных: сырье; энергия; оборудование (аппаратура). Поэтому, когда, например, оценивается степень прогрессивности той или иной технологии (см. 6.3), то эти элементы выступают в качестве главных критериев. По ним проводят сравнения с соответствующими показателями мировых достижений в аналогичных отраслях промышленности строительных материалов. Присутствуя во всех технологиях, они отличаются, в каждой из них своими специфическими особенностями.

Сырье может быть: минеральным и органическим; природным и искусственным; жидким, твердым или газообразным. Для каждой разновидности строительных материалов и изделий имеются и свои традиционные или наиболее эффективные новые виды сырья, своя степень их готовности к участию в технологии переработки, свой рациональный технологический регламент и ему соответствующий технический контроль качества как на стадии прохождения сырья, так и при оценке готовых материалов и изделий.

Энергия на предприятиях применяется механическая, тепловая, электромагнитная, гравитационная, ядерная и др. Наибольшим расходом отличаются электрическая и тепловая; пока слабо используются на предприятиях строительных материалов атомная и нетрадиционные виды энергии — солнечная, ветровая, гравитационная и др. Основным источником энергии служит топливо — горючие вещества, при сжигании которых возникает тепловая энергия. По происхождению топливо делится на природное (нефть, уголь, природный газ, горючие сланцы, торф, древесина) и искусственное (кокс, моторные топлива, генераторные газы и др.). В настоящее время понятию «топливо» придается более широкое значение. Оно распространяется на все материалы, которые в состоянии быть источниками энергии, например ядерное топливо, ракетное топливо и др. Тепловая энергия преобразуется на ТЭЦ в электрическую. В свою очередь электроцентраль вырабатывает также теплоту, отпускаемую потребителям в виде пара и горячей воды. Теплота преобразуется и в механическую энергию. Последняя генерируется в теплосиловых установках и используется для привода в движение механических машин, используемых, в частности, для производства строительных материалов и изделий.

Оборудование (аппаратура) в технологиях отличается многообразием. О нем обычно судят по наиболее значимым конструктивным узлам и деталям, а также по производительности в единицу времени, степени автоматизации, металлоемкости, безотказности и другим показателям надежности, качеству выпускаемой продукции (полуфабриката). Следует выделить оборудование, используемое на основных переделах. На стадии подготовительных работ используют механические дробильные машины и мельницы как непрерывного, так и периодического действия. Среди них — центробежные, шахтные, струйные, вибрационные, конусные инерционные, шаровые, вальцевые, дезинтеграторные, стружечные (дисковые, барабанные, роторные и другого типа станки), дереводробилки молоткового и других типов, голлендеры и бегуны для распушки асбеста, гасители для распушки извести. Эти машины переводят сырье в дисперсное состояние разного масштабного уровня.

На стадии фракционирования сырья или измельченной массы применяют грохота и вибрационные сита, установки барабанного типа. При выполнении подготовительных работ обычно требуются вращающиеся сушильные барабаны или другие виды нагревательной аппаратуры, затем по технологической цепочке — дозаторы для порошкообразных, зернистых и жидких компонентов автоматические периодического и непрерывного действия, в том числе с фотоэлектрической системой управления.

На стадии приготовления смеси (массы) функционируют смесители гравитационные периодического или непрерывного действия; принудительного действия с включением при необходимости системы нагрева смеси; мельницы-мешалки; оборудование для дистанционной или полной автоматизации операций по приготовлению смеси с поточным или противопоточным нагревом смеси, с принудительным или свободным перемешиванием; оборудование для формования изделий, полотен или покрытий вибрационными и невибрационными методами, в частности, ленточные, шнековые, вакуумные и безвакуумные прессы, экструдеры, центрифуги, торкретные установки, прессующие штампы, трамбовки, машины листо-формующие и стеклоформующие, моторные катки обычные и вибрационные, а также комбинированные; установки для обработки отформованных изделий, в том числе камерные туннельные сушилки, другие тепловые камеры периодического и непрерывного действия, горизонтальные и вертикальные сушилки, автоклавы. Используют установки для электропрогрева горячим формованием; обогрева в электромагнитном поле и при различных иных источниках теплоты — электрических, газовых, лучистой энергии, солнечной и др.; химической обработки с помощью введения химически активных порошков в формуемые смеси, инъекцией химически активного газа или жидкости; комбинированных методов обработки-физико-химических, окрасочно-адсорбционных и др.

6.2. СВЯЗЬ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С ОБЩЕЙ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Общие закономерности и научные принципы, лежащие в основе теоретической технологии, учитываются и используются при определении рациональных параметров и режимов в производственных процессах. Именно вследствие этого между многочисленными фактами, получаемыми на производстве, и общими закономерностями, интерпретируемыми в теоретической технологии, существует теснейшая взаимосвязь. Она и предопределяет в основном спонтанное развитие строительного материаловедения как фундаментальной науки прикладного характера. Наиболее ярко такую взаимосвязь возможно проследить на примере отдельных производственных операций.

1. Весьма распространенными операциями на производстве являются дробление и измельчение компонентов на разных стадиях получения конгломератных смесей: домол цемента по сухому и мокрому способам при производстве бетонов; измельчение известняков или других минеральных материалов при производстве асфальтирующей добавки для асфальтовых бетонов; тонкий помол порошков-пигментов при производстве красочных веществ для защитных и декоративных покрытий; помол кристаллического или аморфного кремнезема, а также использование порошкообразных побочных продуктов химических производств (например, AlF_3 , ферросилиция и др.) для изготовления растворимого стекла как вяжущего вещества в кислотоупорных бетонах, отделочных материалах и др.; сверхтонкое (коллоидное) измельчение наполнителей (кремнезем, корунд, шлак, некоторые металлы) при производстве японских цементах типов А, В, МС, ДСР и др.

С увеличением продолжительности и интенсивности помола увеличивается удельная поверхность и, соответственно, химическая и энергетическая активность получаемых порошкообразных компонентов ИСК. Этот фактор, как уже отмечалось, является весьма благоприятным для дальнейшего развития спонтанных процессов диспергирования частиц вплоть до их атомно-молекулярного уровня на первой стадии отвердевания и для конденсационных процессов — на второй его стадии (см. 2.2.5,) с формированием микро- и макро-дисперсных оптимальных структур.

2. Из производственной практики и экспериментальных исследований было получено множество нередко хаотически суммируемых фактов, которые при глубоком анализе позволили сформулировать закономерности, оказавшиеся не только общими, но и объективными, т. е. встречающимися и в природных условиях. Они в основном базируются на оптимальных структурах. Независимо от генезиса формирования оптимальных структур, т. е. в природе или в технологии, им присуще потенциальное качество — улучшенные (экстремальные) показатели свойств, что, впрочем, пока еще не всегда используется в производственных условиях. В результате нередко качество готовой продукции существенно снижается, сроки долговечности материалов в конструкциях сокращаются. Необходимо, чтобы оптимальная структура, формирующаяся в технологический период, возможно полнее соответствовала эксплуатационным параметрам и производственным условиям, т. е. была рациональной (см. 2.3).

6.3. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Всегда стремятся к тому, чтобы технологии на производстве, в инженерных проектах, научных разработках и других аналогичных случаях были наиболее прогрессивными, передовыми. Однако в настоящее время отсутствует научно-обоснованная критериальная оценка уровня прогрессивности технологий строительных материалов. При необходимости оценку состояния технологии производят по одному из главных ее элементов — качеству готовой продукции, сырью, оборудованию, энергетике, экономике, экологии. Нередко для сопоставления приводится зарубежный опыт или опыт передовых отечественных предприятий аналогичного профиля. В результате формируется сравнительная оценка технологии по одному, двум или большему числу показателей, что приносит пользу в изыскании способов дальнейшего улучшения технологических параметров. И все же метод сравнительной оценки показателей отдельных технологических переделов (операций) не может дать полной и научно обоснованной характеристики прогрессивной технологии; тем более он не может предопределить круг мероприятий, в совокупности с воздействием других факторов, по эффективному совершенствованию технологии в целом. В этом методе отсутствует главное — обобщения, составляющие, как известно, силу всякой науки и, в том числе, строительного материаловедения. При научных обобщениях метод может оказаться приемлемым не только для однотипных, но и различающихся между собой технологий.

Для достижения этих целей вначале потребуется: а) четко и достаточно полно охарактеризовать то состояние производства, которое правомерно отнести к прогрессивной, передовой технологии как в смысловом, так и в количественном выражениях; б) располагать информацией об уровне мировых достижений в соответствующей технологии; в) произвести необходимые критериальные вычисления и оценки технологии. Очевидно, что без этих трех принципиальных данных проводимые изыскания по обеспечению прогрессивности технологий, хотя и могут быть полезными, но носят абстрактный характер как в части оценки, так и совершенствования технологий. Ниже более подробно излагается анализ каждого из этих трех исходных положений.

6.3.1. СМЫСЛОВЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ

Детальный анализ состояния технологий строительных материалов показал, что к прогрессивным, передовым относятся те из них, которые удовлетворяют определенному комплексу экстремумов обязательных показателей, выраженных как в смысловом, так и количественных значениях. К этому определенному комплексу относятся следующие экстремумы: выпуск продукции высокого гарантированного качества; высшая производительность на производстве при минимуме времени для выработки единицы продукции; максимум сбережения природного сырья при возможно более широком использовании техногенного и ему аналогичного; минимум расхода топлива, особенно традиционного, при максимальной экономии тепловой энергии; наивысшая экономия электроэнергии (общей и удельной); максимум обеспечения экологической чистоты как в технологии, так и в материалах; максимальное снижение материалоемкости, особенно металлоемкости готовой продукции и технологического оборудования; минимальные капитальные вложения в единицу продукции, тем более при осуществлении нового или модернизируемого производства; минимальные сроки окупаемости технологии при минимальной себестоимости готовой продукции; максимум элементов высокой культуры в технологии и на производстве в целом; высокая и устойчивая конкурентоспособность продукции на внутреннем и внешнем рынках.

Вышеуказанные показатели прогрессивности технологий составляют комплексную систему, в которую можно привести дополнительные или исключить отдельные из них, но при обязательном сохранении ее взаимосвязанности и целостности. Кратко остановимся на каждом показателе.

Первое место по удельной значимости в комплексе показателей прогрессивности занимает высшее качество выпускаемой продукции. Под высшим качеством понимается, во-первых, безусловное соответствие продукции нормативным требованиям стандартов или технических условий и, во-вторых, массовая однородность выпускаемой продукции по одному или нескольким ключевым параметрам (свойствам, составу, структуре, внешним признакам и др.). В качестве ключевого параметра при определении однородности весьма целесообразно принимать оптимальную структуру. Ее наличие у ИСК фиксируется совпадением нормируемых показателей свойств с их экстремальными значениями, что следует из обратного действия закона створа. Только при оптимальных структурах и, следовательно, экстремумах свойств на уровне заданных (или стандартом обусловленных) с соблюдением статистической однородности массовой продукции возникает и развивается теснейшая взаимосвязь последней с технологией производства, с практическими способами влиять через технологию на качество готовой продукции.

При любых положительных характеристиках технология не может быть отнесена к прогрессивной, если продукция не удовлетворяет заданным требованиям или ниже по качеству аналогичной продукции, выпускаемой по другим технологиям. Заданные требования могут быть как на уровне мировых стандартов (достижений), так и выше их. К этим требованиям относится также долговечность материала (изделия) в конструкции, слагаемая из трех ее временных элементов. Не всегда высокий уровень качества продукции, фиксируемый в предэксплуатационный период, служит автоматическим гарантом долговечности материала в конструкциях.

Второй основной показатель прогрессивной технологии — высшая производительность предприятия по выпуску готовой продукции, которая адекватна, как правило, наивысшей производительности труда, приходящейся на одного работающего или одного рабочего. Чем больше за единицу времени выпускается продукции высшего качества и, следовательно, больше приходится ее при расчете на одного рабочего (или работающего), тем прогрессивнее технология по этому показателю. В результате обеспечиваются наивысшая производительность и мощность предприятия в целом. Руководство и коллектив получают повышенную прибыль и возможность обновлять оборудование,

развивать производство на предприятии с использованием последних достижений в научно-техническом прогрессе.

Третий показатель прогрессивности технологий обусловлен минимальным расходом природного сырья по отношению к его общему потреблению на данном производстве строительных материалов и изделий, или на единицу продукции. Чем в меньших количествах потребляется горных пород и минералов, включая воду, и с минимальными отходами при переработке их в готовую продукцию, чем больше для этих целей используется техногенного сырья, а также попутных продуктов горно-обогатительных комбинатов, нетрадиционного местного сырья или синтезированного, тем прогрессивнее данная технология. Сюда же следует добавить и низкий процент отбракованной продукции, уменьшение плотности и размеров изделий и другие факторы. Необходимость включения всемерной экономии природного сырья в комплексный критерий прогрессивности следует из очень тревожных реалий нарастания в нем острого дефицита и неблагоприятной экологической обстановки в районах его разработки. В нашей стране приходится добывать из недр Земли свыше 2 млрд. т природного сырья для производства строительных материалов, причем при очень низком коэффициенте его использования. Значительно больше половины направляется его в отвалы. В особой заботе нуждается природный минерал из группы оксидов, в жидком состоянии именуемый водой, а в твердом — льдом. Пресная вода относится к самому ценному полезному ископаемому, к тому же крайне дефицитному, так как ее количество на Земле не превышает двух процентов от общего объема воды.

Четвертый показатель прогрессивности технологий — минимальное расходование традиционных топлив (нефти, газа, каменного угля) как ценнейших видов природного сырья для химической промышленности и весьма необходимых и важных для других нужд в стране. Этот показатель включает также необходимость максимального снижения удельного топливопотребления и максимальную экономию тепловой энергии. Показатель прогрессивности по минимальному расходованию топлива и тепловой энергии возрастает по мере снижения количества теплоты, потребляемой на единицу производимой продукции на предприятии в единицу времени без потери ее качества.

Пятый показатель характеризует максимальную экономию электроэнергии либо по общему расходу, либо, что более наглядно, по удельному, отнесенному к единице продукции или иной единичной величине, либо с помощью обеих величин. Приходится учитывать, что электрическая энергия продолжает оставаться самым главным энергоносителем и всегда требуется ее максимальная экономия, в частности за счет всемерного снижения тепловых потерь, избыточного электроосвещения, электроперегрузок в технологическом оборудовании. Четвертый и пятый показатели прогрессивной технологии характеризуют уровень ресурсе- и энергосохраняющей технологии.

Шестой показатель прогрессивной технологии устанавливается по эффективному решению в ней двух главнейших экологических проблем в строительном материаловедении. Первая — охрана окружающей среды при производстве строительных материалов и изделий, вторая — охрана строительных материалов, изделий и конструкций, получаемых по данной прогрессивной технологии, от негативного воздействия на них окружающей среды.

Решение первой проблемы, кроме упомянутого выше минимума расхода природного сырья, минимума расходования воды, особенно пресной, предотвращения загрязнения водоемов, предусматривает полное исключение выделения вредных веществ в атмосферу, сточную воду или почву. В связи с этим следует отметить, что в глобальном масштабе в результате хозяйственной деятельности человека в атмосферу ежегодно выбрасывается во всем мире $25 \cdot 10^9$ т загрязнителей: пыли, газов, аэрозолей. В нашей стране в загрязнении атмосферы доля промстройматериалов составляет 12% среди других отраслей промышленности. Такое выделение загрязнителей связано с переработкой некоторых

разновидностей сырья, транспортированием, хранением и применением изготавливаемых из такого сырья материалов. Выделения возможны также на стадии эксплуатации изделий и конструкций в зданиях и сооружениях, особенно при большой их поверхности или протяженности, например дорожных покрытий, аэродромов, кровельных покрытий.

Кроме опасного загрязнения среды, другим источником экологических потрясений оказался, как уже отмечалось в третьем показателе прогрессивности технологий, быстро сокращающийся резерв природных ресурсов сырья. Тем не менее эксплуатация коренных месторождений продолжается и не в сокращающихся размерах. В настоящее время в нашей стране возросла опасность еще и массового появления местных карьеров по добыче сырья для нужд малых предприятий. Множество карьеров и ям, возникающих при добыче песка, гравия, глины, гипса и других полезных ископаемых открытым способом, не только занимают обширные плодороднейшие земельные площади, но и сосредоточивают вокруг себя крупные скопления пустых пород (вскрыши) и отходов (около 30%) от камнеобработки. Кроме того, имеется постоянная необходимость в тщательной и систематической проверке инертности используемого природного сырья и используемых отходов производства с помощью дозиметров (радиометров).

Решение второй экологической проблемы, нередко именуемой как «экология материалов», заключается в предотвращении воздействия окружающей среды на материалы, изделия и конструкции, находящиеся в эксплуатации. Эти негативные воздействия завершаются обычно либо биоповреждениями мико-, бактерио-, альголихоно-, гербодеструктурами, либо коррозией от неорганических и органических реагентов. Те и другие реагенты могут содержаться в окружающей среде одновременно. Примером служат сточные воды многих предприятий, в особенности химической промышленности, причем состав реагентов во времени не остается постоянным, осложняя борьбу с коррозией.

Эффективное решение обеих экологических проблем технологическими методами имеет приоритетное значение в оценке показателя прогрессивности технологии производства.

Седьмой показатель прогрессивности технологии фиксирует минимальную величину материалоемкости, особенно металлоемкости, действующего основного и вспомогательного оборудования (аппаратуры). Этот показатель отражает также общее снижение расходования материалов, особенно металлов, потребляемых для изготовления готовой продукции по принятой технологии.

Восьмой показатель указывает размер реальных капитальных вложений при организации новых технологий или модернизации (реорганизации) действующих. Очевидно, что чем ниже объем капвложений в пересчете на единицу продукции, тем прогрессивнее принятая технология, что влияет на уровень повышения данного показателя. Во всех случаях целесообразно использовать специализированную инструкцию по определению эффективности капитальных вложений в строительство или реконструкцию предприятия по производству строительных материалов и изделий.

Девятый показатель прогрессивности характеризует высокую культуру технологии и производства в целом. Он является комплексным, так как содержит весьма разнородные компоненты. К ним относятся: состояние охраны труда, техники безопасности и социального комфорта, санитарно-гигиенические условия труда, обеспеченность внутриводской коммуникацией и коммунальной благоустроенностью, озеленение заводской площадки и предзаводской территории. Каждый компонент этого комплексного показателя оценивают обычно по отдельности и сопоставляют с аналогичными технологиями различных производств, а чаще — в сопоставлении с нормативными указаниями, например, с правилами по технике безопасности, производственной санитарии и др.

Прогрессивные предприятия и цеха как новых, так и реконструируемых объектов должны отвечать требованиям действующих Санитарных норм, Строительных норм и правил и др. Освещенность заводов и цехов, производственных площадок и рабочих мест регла-

ментируется правилами устройства электрических установок. То же в отношении противопожарных требований с возможной безопасной эвакуацией людей через соответствующие выходы.

Этот показатель трудно поддается количественному измерению. Для этих целей могут служить балльная и экспертная системы оценок¹.

Десятый показатель прогрессивности производства характеризует высокую организацию использования современных средств технического контроля и управления, базируется на достижениях четвертой части общей теории ИСК (см. с. 139), а также служит продолжением и развитием критерия высокой культуры технологии и в целом всего производства (девятого показателя, см. с. 152).

Одиннадцатый показатель — экономический. Обобщающими значениями его обычно служат приведенные затраты на единицу продукции, величина себестоимости, показатель рентабельности, срок окупаемости технологии. Своеобразным экономическим показателем является и отношение стоимости к единице измерения требуемого ключевого свойства, например прочности. Возможны и, другие технико-экономические показатели производства. Среди них: удельный расход сырьевых материалов; то же — топлива технологического, электроэнергии силовой, пара технологического и т. п. Все они могут соотноситься с расходом денежных средств.

Нередко нахождение экономического показателя тесно увязывают с задачей оптимизации технологического процесса. Математически формализованная задача оптимизации технологии заключается обычно в определении условий экстремума некоторой функции конечного числа переменных, слагаемых в экономическую эффективность продукции.

Очевидно, что этот важнейший показатель прогрессивности технологии, подобно некоторым другим, отражает в себе комплекс факторов, от которых он зависит, — производительность труда, материалоемкость, срок окупаемости капитальных вложений и др.

Двенадцатый показатель характеризует технологию с позиций ее способности обеспечивать конкурентоспособность готовой продукции на внутреннем и внешнем рынках. Этот показатель находится в прямой зависимости от первого показателя — качества, однако, он имеет и свои важные особенности, которые помогают обеспечивать конкурентоспособность готовой продукции. В частности, он непосредственно связан с показателем уровня культуры производства, поскольку только при безупречных технологических УСЛОВИЯХ можно достичь надежной конкурентоспособности.

Таким образом, комплексом показателей возможно оценить состояние технологий, хотя естественно предположить, что двенадцати может оказаться недостаточно и потребуются дополнительные. Но возможно, что и двенадцати окажется слишком много для характеристики какой-либо конкретной технологии; тогда целесообразно уменьшить их численность.

В такой обобщенной форме выраженная смысловая характеристика прогрессивной технологии является необходимой, но важно еще каждый показатель выразить количественной величиной с соблюдением соответствующей ему размерности, а затем перейти к критериальной оценке. Последнее достигается посредством критериев оптимальности в их безразмерном выражении, т. е. отнесением реальных числовых значений к показателям мировых достижений. Если отсутствуют данные о последних, тогда — к аналогичным экстремумам иного характера, включая расчетно-теоретические для некоторой «идеализированной» технологии. Однако необходимо использовать все возможности — публикации, патентный анализ, бюллетени, деловой контакт и т. п. для получения информации о последних достижениях мировой практики, включая отечественную, в отношении этой технологии.

¹ Ефименко А.З. Применение метода экспертных оценок в строительной индустрии. М: МГСУ, 2001.

Критерий оптимальности из двенадцати вышеуказанных в их числовом выражении можно определить с помощью симплексных величин. Их простейшие значения получают делением фактического достижения предприятия по данному показателю прогрессивности технологии в его числовом выражении на аналогичную величину на другом предприятии, принятую обоснованно в качестве «уровня мировых достижений». Если такая симплексная величина является единственной для изучаемого показателя прогрессивности, то она после ее определения становится числовым безразмерным критерием оптимальности. Если же фактическое состояние уровня показателя прогрессивности потребовалось оценивать по нескольким симплексным величинам, тогда необходима их индексация. И критерий оптимальности будет слагаться как сумма симплексных величин после определения их как частных делений числового значения реального уровня предприятия на экстремальное значение уровня мировых достижений, поделенная на число симплексов: $K_{onm} = \sum S_i/n$, где S_i — текущий симплекс, n — число симплексов.

Очевидно, что чем ближе каждая симплексная величина к единице, тем выше и критерий оптимальности, а следовательно, тем эффективнее технология по рассматриваемому показателю прогрессивности. Однако, возможен вариант, когда критерий оптимальности окажется равным или выше 1. Чаще все же требуется реализовать оптимизирующие факторы, которые приблизят критерий к 1. Симплекс может быть и больше 1, например при повышенной себестоимости по сравнению с передовой технологией, если, например, расход горных пород и минералов на единицу продукции выше по сравнению с передовыми предприятиями, на которых больше употребляется техногенного сырья взамен природного. Но и тогда требуется путем реализации соответствующих оптимизирующих факторов обеспечить снижение симплекса до 1 (см. 6.4). Таким образом, возможно как увеличение положительных значений, так и уменьшение отрицательных значений симплексов, но с достижением в обоих случаях оптимальных их величин, равных 1.

Для прогрессивной технологии каждый показатель прогрессивности в количественном отношении характеризуется критерием оптимальности максимальной величины, равной 1. При оценке технологии с помощью 11 показателей прогрессивности, т. е. при одиннадцатибальной системе, прогрессивная технология оценивается суммарной величиной, равной 11. При других балльных системах потребуются и соответствующие им величины критериев оптимальности, например, при 10 показателях — величиной 10, при 12 показателях — величиной 12 и т. д. Если же суммарные значения критерия оптимальности не достигают предельно высоких значений, тогда реальную величину прогрессивности вычисляют путем деления фактической суммы на число критериев оптимальности. Так, например, если при одиннадцатибальной шкале оценок фактическая величина критерия оптимальности оказалась равной 8,7, тогда степень прогрессивности технологии оценивается величиной $8,7/11=0,8$ (точнее — 0,79), т. е. на 20% ниже уровня мировых достижений в данном производстве готовых изделий (материалов). По рекомендованной в теории ИСК классификация оценок технологий выглядит так: непрогрессивная — 0,01—0,21; малопрогрессивная 0,22—0,41; среднепрогрессивная 0,42—0,75; высокой прогрессивности — 0,76—1,00; суперпрогрессивная, когда критерий оптимальности свыше 1,00. Отсюда очевидно, что вышеописанная технология относится к технологии высокой прогрессивности. В отношении ее могут быть найдены дополнительные резервы оптимизирующих факторов, способных поднять технологию на следующий, более высокий уровень прогрессивности.

Вышеизложенный метод оценки степени прогрессивности технологий позволяет перейти от описательно-смысловой характеристики по экстремальным значениям соответствующих показателей к числовой оценке с учетом полного комплекса показателей прогрессивности. Но в этом методе имеется и определенный недостаток, влияющий на точность оценки в сторону, как правило, занижения эффективности

воздействия оптимизирующих факторов при их реализации. Этот недостаток связан с тем, что, принимая для упрощения расчетов среднеарифметическое значение симплексных величин, предполагалось последовательное воздействие факторов на технологию. В реальных же условиях на производстве факторы чаще всего действуют не последовательно, а совмещенно друг с другом. Одновременное же воздействие нескольких или всех факторов приводит к синергизму с усилением (очень редко с ослаблением) конечного эффекта по сравнению с простым суммированием эффектов от факторов, воздействовавших по отдельности, в последовательном порядке их чередования. Синергетический эффект трудно установить аналитически, но он может быть определен эмпирически с последующей математической обработкой опытных данных, пользуясь в частности, методом математического планирования эксперимента. В нем за нижний предел варьирования может быть принят количественный эффект от реализации фактора без учета синергизма, за верхний предел — единица; ей равен симплекс при наивысшем значении числителя, равного знаменателю, как уровню мировых достижений. Его результаты обычно выражаются сложной функцией в виде многочленных полиномов или уравнений регрессии. В последнем коэффициенты косвенным образом отражают приоритетность того или иного фактора или нескольких факторов перед всеми другими, принимавшимися для совершенствования технологии. При расчете коэффициентов уравнений регрессии некоторые из них принимают настолько малые числовые значения, что они не способны, как правило, заметно повлиять на величину обобщенного критерия оптимальности. Тогда их можно опустить и решение уравнения регрессии упрощается. Важно, однако, произвести предварительную проверку по критериям Фишера и Стьюдента.

6.4. ОПТИМИЗИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ДО УРОВНЯ ПРОГРЕССИВНЫХ

Ниже приведены основные оптимизирующие факторы, которые влияют на величину показателей прогрессивности (обобщенных критериев оптимальности), учитываемые с помощью симплексных величин после их реализации на производстве с соблюдением соответствующих размерностей, адекватных принятым в мировой практике.

1. Факторы для обеспечения высшего качества изготавливаемой продукции прямо и непосредственно зависят от прогрессивности технологии. Отбор факторов (мероприятий), способных в технологический период благоприятствовать формированию готовых продуктов (материала, изделий) высшего качества, должен быть весьма тщательным в каждом конкретном случае. Вместе с тем имеются общие мероприятия, применяемые для большинства материалов и изделий. К ним относятся: оптимизация состава и структуры ИСК-существенное повышение качества используемого вяжущего компонента, предопределяющего, согласно закону конгруэнции, высшее качество ИСК; всемерное повышение качества заполнителей и тонкодисперсных наполнителей, если они являются компонентами готового продукта (материала или изделия), путем их активации, обогащения, классификации плотных смесей, улучшения формы частиц за счет снижения их округлости и др.; использования механо-хими-ческой обработки смесей с введением в них функциональных или полифункциональных добавочных веществ (добавок); оптимизации тепловых и тепловлажностных режимов, реализации других физических воздействий, благоприятствующих формированию микро- и макроструктуры и структурно-чувствительных свойств ИСК на различных стадиях технологии; всемерное обеспечение наибольшей однородности полуфабриката (смеси) и готовой продукции с проведением контроля за ее уровнем; обеспечение уплотнения смеси (массы) до формирования структуры высокой плотности или с необходимой пористостью; разработка и внедрение в производство технологических, конструкционных и эксплуатационных мероприятий по увеличению временных элементов долговечности и в целом надежности материалов в конструкциях; придание материалам и изделиям завершенных внешних форм и транспортабельности, способствующих при высоком качестве продукции необходимой конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках; обеспечение технологической бездефектности готовой продукции и, как следствие, полное исключение брака; максимальное снижение себестоимости продукции всеми возможными техническими средствами (см. ниже).

Вышеперечисленные и другие, здесь не упомянутые, мероприятия, осуществляются в технологический период с помощью модернизации оборудования и инструментов, автоматизации, использования оптимальных режимов синергообработки сырьевых компонентов и их смесей и т. п.

На основе симплексных величин, получаемых по каждому реализуемому фактору, вычисляют комплексную величину критерия оптимальности по высшему качеству продукции как одному из главных показателей прогрессивности технологии.

2. Факторы высшей производительности труда по выпуску готовой продукции, приходящейся на одного рабочего (работающего), зависят от ряда показателей, размерность и числовая оценка которых может быть различной. При экспертной оценке (количественной или порядковой) каждому баллу должно быть придано обоснованное содержание: количество поточно-механизированных и автоматизированных линий; количество микропроцессорной техники, установленной в отдельных узлах этих линий; число возможных перестановок и переналадок технологических линий по системе гибкой технологии (ГПС); число действующих роботов, особенно на трудоемких операциях; количество АСУП и АСУПТ с целесообразным выделением самодиагностики неполадок; продолжительность цикла выработки единичной массы продукции; наличие и число автоматизированных технологических комплексов (АТК).

Важной характеристикой предприятий служит их мощность по количественному выпуску в год готовой продукции, особенно по сравнению с проектной или ожидаемой при внедрении прогрессивной технологии. Эти величины мощностей (реальной и проектной или ожидаемой) возможно соотнести между собой и получить симплексную безразмерную характеристику мощности предприятия. И тогда она тоже сможет составить свой входной фактор обобщенного критерия оптимальности. То же в отношении обновления активной части основного фонда с заменой физически изношенного и морально устаревшего оборудования новым, высокоэффективным.

Весьма уместным являются и сравнения по численности работающих на реальном и передовом предприятии, если объемы выпускаемой продукции в год на них остаются практически одинаковыми.

3. Факторы бережного расходования природного сырья складываются из следующих основных элементов: минимального потребления горных пород и породообразующих минералов на единицу массы или объема готовой продукции; минимального расходования пресной воды; максимального использования техногенного сырья и других побочных продуктов промышленности, сельского хозяйства и отходов древесины, а также горно-обогатительных комбинатов; максимальная замена традиционных видов сырья на местные сырьевые ресурсы; низкий процент отходов при использовании природного сырья и природных добавок при производстве готовых материалов и изделий; низкий процент отбракованной продукции с напрасно израсходованным в ней сырьем; экономное расходование материалов в технологии.

Таким образом, в этот показатель прогрессивности входят 7 или 8 основных элементов как в реальной технологии на данном предприятии, так и на предприятии с прогрессивной технологией. Производится подсчет симплексных числовых значений и по ним — обобщенного критерия оптимальности с учетом всех или главной части элементов, образующих показатель бережного (экономного) расходования природного сырья и природных добавок в производстве выпускаемой продукции.

4. Факторы экономии природного топлива и тепловой энергии можно получить различными способами. К основным способам относятся следующие: полное исключение из технологии природных видов топлива — нефти, угля и природного газа — с заменой их возобновляемыми источниками тепловой или механической энергии; использование в технологии при выполнении возможно большего количества операций нетрадиционных видов топлива или тепловой энергии; снижение количества теплоты, потребляемой на единицу производимой продукции в единицу времени; обогащение топлива с повышением его теплотворной способности; внедрение конвейер-но-поточной технологии.

Из этих способов наиболее многообразный и нередко сложный по практическому осуществлению — снижение количества потребляемой теплоты на единицу продукции. Возможны как теплофизические, так и технологические варианты экономии. Они были рассмотрены выше, но здесь требуется перечислить их более четко с тем, чтобы можно было выразить в виде симплексных и комплексных величин.

Количество потребляемой теплоты на единицу продукции можно понизить путем: рекуперации продуктов сжигания топлива; использования вторичных тепловых ресурсов в основном производстве и, отдельно, для побочных мероприятий — обогрева подсобных помещений, устройства вентиляции и т.п.; перехода на сухую технологию взамен мокрой при термической обработке сырьевых смесей; использования добавок и других способов снижения температуры при обжиге сырья или полуфабрикатов; использования вакуума при нагреве и сушке; сокращения времени воздействия высоких и повышенных температур при термической обработке сырьевой смеси или полуфабрикатов; использования обжига в «кипящем слое»; использования холодильников и теплообменников лучших образцов и моделей; замены старых печей новыми, более экономичными по расходу теплоты при обжиге; обновления тепловых сетей и тепло-

изоляции агрегатов; понижения потерь при транспортировании нагретых материалов; сокращения в готовом продукте доли обжигаемого сырья; увеличения габаритов печей с повышением их производительности; оптимизации конструкций обжигательных печей, модернизации в них форсунок, теплоизоляции, футеровки; блокирования обжигательных печей и сушильных установок; автоклавной обработки при сушке сырца; замены двукратного обжига однократным; использования импульсивной системы сжигания топлива и др.

5. Факторы экономии электроэнергии в кВт·ч по общему или удельному расходу, отнесенному к количественной или качественной единице продукции, или в чел·ч, или на 1 рабочего в год, являются важнейшими показателями прогрессивной технологии. Анализ деятельности производственных предприятий показал, что могут быть достаточно общие и сугубо специфические, но существенные способы уменьшения расхода электроэнергии без снижения мощности предприятий или ухудшения качества готовой продукции. К ним относятся следующие: внедрение АСУП, УСУП или АТК; внедрение поточно-конвейерной линии, что снижает продолжительность цикла выпуска изделий и, как следствие, уменьшает расход электроэнергии; замена оборудования новым, с более высоким КПД при меньшем расходе электроэнергии для выполнения прежних операций; внедрение рациональных технологических операций, благоприятствующих уменьшению расхода электроэнергии при сохранении или улучшении качества продукции; изменение конструктивных размеров и физических свойств изготавливаемой продукции, способствующих уменьшению расхода электроэнергии и повышению качества.

Примеры благоприятного изменения технологических операций: помол сырьевых материалов не по открытому, а по замкнутому циклу; снижение температуры в мельницах; введение разного рода интенсификаторов помола, электроактиваторов, пластификаторов смесей с целью увеличения производительности формовочных агрегатов; перевод с двукратного на однократный обжиг (например, при производстве глазурованных плиток); использование вакуума в электропечах и др. Примеры благоприятного влияния замены оборудования новым: использование каскадных многокамерных мельниц; замена шаровых, сепарационных и других традиционных мельниц новыми — валковыми, струйными; применение сушилок на основе электротеплонасосов, что сокращает срок сушки и, следовательно, расход электроэнергии; применение распылительных сушил, например при изготовлении пресс-порошков (по сравнению с фильтр-прессовыми с сушильными барабанами) и др. Некоторые способы уменьшения расхода электроэнергии, подобно тому, как уже было при экономии теплоты или топлива из разнородных компонентов, например способ экономии электроэнергии при внедрении различных рациональных технологических операций, или способ экономии путем изменения физических свойств продукции или ее конструктивных размеров, и т.п. И тогда вычисление симплексных величин несколько усложняется, поскольку общая эффективность от данного способа складывается из отдельных эффектов каждого предпринимаемого мероприятия взамен прежнего выполнения технологической операции. В числителе и знаменателе симплекса появляются слагаемые отдельных эффектов и их суммарные значения. Понятно, что они продолжают оставаться безразмерными и их можно объединить с симплексами, получаемыми от реализации других способов экономии электроэнергии. В результате формируется обобщенный критерий оптимальности по экономии расхода электроэнергии на данном предприятии, подвергнувшегося совершенствованию и модернизации

6. Факторы экологической чистоты технологии и материалов имеют приоритетное положение в оценке прогрессивной технологии. Чтобы технология была чистой или максимально приближалась к таковой, следует предусмотреть мероприятия экологического характера. Условно их можно разделить на основные и, как правило, общие для многих технологий, и на специфические для данного производства. К основным относятся следующие: создание безотходной технологии; минимальное

расходование природного сырья — горных пород и породообразующих минералов, в том числе воды, особенно пресной, что возможно выразить отношением массы готовой продукции к массе израсходованного для этих целей исходного природного сырья во всех его видах; предотвращение нарушений экологического баланса при разработке месторождений природного сырья; исключение возможной эрозии почвы, проведение рекультивации выработанных пространств, сохранение и перемещение плодородного слоя почвы, проверка инертности сырья и отходов от его разработки с помощью радиометров и т.п.; максимальное использование разных побочных продуктов с тем, чтобы завалами и вредными выделениями они не нарушали экологии окружающей среды; полное или максимально возможное исключение из технологий вредных выделений при переработке сырья или сырьевых смесей в окружающую среду, в связи с чем, в частности, строго учитывать предельно допустимую концентрацию пыли в воздухе, равную по нормам до $0,06 \text{ г/м}^3$. Как следствие — применение высокоэффективных газо- и пылеулавливающих установок, своевременный анализ дымовых газов и их фильтрации; предотвращение вредных выбросов вследствие неполного сгорания топлива, особенно твердого, и топливосодержащих добавок в сырьевой смеси и улавливание их с помощью эффективных устройств с последующей проверкой концентрации их в атмосфере; исключение вредных выделений из готовой продукции в период ее эксплуатации, а также при ее хранении и транспортировании, с организацией систематического контроля концентрации вредных веществ в рабочем пространстве или в атмосфере и водоемах. Все эти мероприятия поддаются количественным измерениям, хотя и в различных размерностях, но сли-чимых между собой при переводе их в симплексы.

К специфическим мероприятиям относятся: предотвращение вредного воздействия в связи с применением нестойких добавок, способных к испарению, улетучиванию (сублимации), выделению вредных ингредиентов — из отходов флотации руд или при углеобогащении, растворение их в воде с переносом опасных растворов в водоемы и пр.

Безразмерные симплексные величины, получаемые в результате соотношений реальных значений экологической чистоты по каждому оптимизирующему фактору (мероприятию) и номинальных значений при прогрессивной технологии, достигнутых на передовых предприятиях и фирмах или вычисленных теоретически, позволяют перейти к определению обобщенного критерия оптимальности.

Вторая экологическая проблема, названная выше как экология материалов, также решается с помощью реализации оптимизирующих факторов как основных или общих, так и специфических.

К основным мероприятиям относятся: предотвращение биоповреждений эксплуатируемых строительных изделий и конструкций с помощью превентивных мер, предпринимаемых в технологический период; предотвращение коррозии эксплуатируемых строительных изделий и конструкций от воздействия неорганических и органических реагентов с помощью превентивных и последующих мер, предпринимаемых в технологический и эксплуатационный периоды. Важно только обеспечить индифферентность предпринимаемых мер в отношении окружающей среды, особенно при использовании добавок, вводимых в составы изготавливаемой продукции. Назначение оптимизирующих факторов должно производиться с учетом того, что реагенты биоповреждений и коррозии могут содержаться в окружающей среде одновременно, например, как отмечалось выше, в сточных водах некоторых предприятий.

7. Факторы минимальной величины материалоемкости, особенно металлоемкости, должны, по-видимому, определяться раздельно по металлу, главным образом черному, и сырьевым материалам, направляемым в виде полуфабриката (смеси) на изготовление продукции. При разработке оптимизирующих факторов следует учитывать, что повышенный расход металла обычно вызван: утяжелением технологического оборудования против его конструкции в более современных технологиях; увеличенным износом трущихся рабочих деталей оборудования; нерациональной технологией

полуфабриката или продукции с применением в ней дополнительных металлических или металлизированных агрегатов; пониженной прочностью или износостойкостью принятого металла для оборудования или его деталей; использованием излишнего или несовершенного вспомогательного оборудования и инструмента; использования металла в узлах и деталях, которые можно заменить менее дефицитным материалом без конструктивного ущерба, и т.п.

Увеличенный расход материалов, повышающий материалоемкость производства, обычно вызван увеличенной массой изделий; избыточным размером выпускаемой продукции, например по их толщине; использованием многих вспомогательных материалов на подобных операциях без особой к тому необходимости и т.п.

Материало- и металлоемкость измеряют, как правило, в абсолютных значениях массы (т или кг) или с отнесением массы к единице продукции.

8. Факторы минимума капитальных вложений в новую или модернизированную технологию в пересчете на единицу продукции подразделяются на: уменьшающие размер капвложений без снижения производственной мощности предприятия; повышающие производственную мощность предприятия при больших или меньших объемах капитальных вложений.

К первой группе относятся мероприятия, которые способны снизить размеры* капитальных вложений против предусмотренных по проекту нового строительства или реорганизации существующего предприятия. Среди таких мероприятий: укрупнение предприятия до оптимальных размеров при строительстве новых с более мощным оборудованием и высокой производительностью (при снижении габаритов оборудования на единицу мощности). Так, например, печи мощностью свыше 1 млн. т клинкера снижают удельные капвложения примерно на 5% по сравнению с печами мощностью 600 тыс. т.; уменьшение площади новой застройки или реорганизуемого предприятия; уменьшение размеров здания и помещений под оборудование, например, при внедрении новой поточно-конвейерной технологии по изготовлению керамических плиток или распылительных сушилок вместо фильтр-прессов при том же производстве (площадь под оборудование уменьшается в 10 и более раз); обеспечение кратчайших путей подачи сырья, полуфабрикатов и готовой продукции; уменьшение протяженности внутризаводских коммуникаций; соблюдение минимальных объемов земляных планировочных работ; приближение или даже примыкание складских помещений к транспортным путям; применение более экономичных материалов и конструкций при возрастающей положительной роли их в производственном цикле, например замена штучного огнеупорного кирпича при монтаже тепловых агрегатов на жаростойкие бетонные блоки, замена кирпича при строительстве дымовых труб сборными элементами с уменьшением массы трубы в 7—8 раз, сокращением сроков строительства в 6 раз; замена капитальных зданий для размещения туннельных печей при обжиге кирпича на здания из легких конструкций или размещение печей вне зданий со снижением на 10—15% капвложений на их «открытый монтаж»; то же — распылительной сушилки при производстве керамических плиток; установка цементных печей и шлам-бассейнов без укрытия и др.; использование других возможных мероприятий, повышающих эффективность капвложений или снижающих размеры без негативного влияния на производственную работу предприятия. Так, например, при сухом способе обжига клинкера сокращаются капвложения при строительстве предприятия примерно на 50% по сравнению с мокрым; при вибрационном способе производства ячеистого бетона, по сравнению с литевым, сокращаются производственные площади под установку оборудования и металлоемкость оборудования на 30—40% и, соответственно, их стоимость и т.п.

Ко второй группе факторов относятся: обновление активной части основных фондов, имея в виду, что с увеличением доли оборудования, особенно нового, в общем составе затрат величина удельных капвложений снижается; обеспечение минимальных простоев нового

оборудования при реконструкции предприятия; всемерное уменьшение топливно-энергетических расходов при капвложениях в реконструируемое предприятие.

Следует отметить, что в ближайшем будущем реконструкция, под которой понимается и техническое перевооружение, явится, по-видимому, главным направлением воспроизводства основных фондов. И чем выше доля обновленных основных фондов по отношению к первоначальной полной стоимости основных фондов, выраженных в рублях, тем выше абсолютная экономическая эффективность капитальных вложений. Последняя определяется как отношение годового прироста прибыли в результате реконструкции к величине капвложений в реконструкцию (техническое перевооружение) предприятия. Отметим, что годовой прирост прибыли, в свою очередь, равен разности себестоимости единицы выпускаемой продукции до и после реконструкции, умноженной на годовой объем производства после реконструкции.

Эффективность капитальных вложений, определенная по первой и второй группам факторов, на них влияющих, позволяет перейти к вычислениям симплексных величин, ориентируясь по тем же факторам на уровень достижений передовых новых или реконструируемых предприятий как в отечественной, так и особенно в зарубежной практике. По двум или большему числу симплексов определяют и величину критерия оптимальности капвложений в действующее или вновь организуемое предприятие.

9. Факторы прогрессивности в отношении культуры технологии и производства трудно поддаются количественному измерению. Ближе других может служить балльная система оценок каждого отдельного мероприятия и всей совокупности их, изложенных выше.

Но некоторые мероприятия из этого комплекса оптимизирующих факторов все же поддаются характеристикам и с размерностью. Например, состояние техники безопасности и охраны труда нередко оценивает количеством случаев травматизма и профессиональных заболеваний, отнесенным к числу работающих на данном предприятии. Другим примером характеристики с ее размерностью может быть экономия топливно-энергетических ресурсов на производстве как компонент культуры технологии и производства. Впрочем, настоящий показатель прогрессивности больше все же характеризует не технологию и не технологический процесс, а технологический регламент и организацию производства на данном предприятии. Сюда же относится и культура производственного процесса и предприятия в целом. В принципе отдельные элементы, из которых складывается понятие культуры, позволяют перейти от размерной или балльной систем оценок к симплексной и комплексной (через критерий оптимальности), особенно если предварительно разработать шкалу экспертных оценок применительно к отдельным элементам, слагающим этот показатель прогрессивности производства.

10. Факторы высокой организации технического контроля и

управления им базируются на своевременную проверку качества на всех этапах технологического процесса. Главным методом технического контроля ^служит эксперимент.

11. Факторы экономические, подобно некоторым другим, являются комплексными, отражают в себе повышение производительности труда, снижение материалоемкости, экономию материальных и топливно-энергетических ресурсов, уменьшение срока окупаемости капиталовложений, затраты труда и др. Поэтому и выбор оптимизирующих факторов в виде наиболее эффективных мероприятий по снижению себестоимости единицы продукции, соотносимых каждый раз с аналогичными количественными значениями на предприятиях с прогрессивной технологией, должен исходить из этой комплексной особенности данного показателя. В результате получают симплексные величины по основным технико-экономическим показателям, а также годовой экономический эффект от производственной деятельности предприятия в рублях или других денежных знаках, определяемый по формуле (3.18). Весьма примечательной экономической характеристикой служит отношение себестоимости к единице измерения

ключевого свойства продукции, например к прочности при сжатии или других видах напряжения. Вместо себестоимости может быть принята внутрипроизводственная цена, т.е. с добавлением прибыли. Обобщенный критерий экономической оптимальности рассчитывают по аналогии с другими показателями прогрессивности с помощью целевой функции из симплексных оптимизирующих факторов. Но возможен и другой характер этой целевой функции: детерминированный -с включением лишь определенных величин, и стохастический --с включением также и случайных величин и, следовательно, требующих предварительной статистической обработки.

12. Факторы эффективной конкурентоспособности продукции на рынке отражают безупречность и надежность практически всех предшествовавших показателей прогрессивности технологии и производства в целом. Массовая продукция должна соответствовать мировым стандартам как по качественным параметрам, так и по внешнему «товарному» виду, выразительности внешних форм, удобству при хранении, транспортировании, перегрузочных работах, прочности и надежности упаковочных материалов и тары, и, по возможности, при достаточно низкой себестоимости. Последнее окажет благоприятное влияние на снижение цены продукции, что позитивно повлияет на конкурентоспособность ее на внешнем и внутреннем рынках.

В настоящее время не имеется оперативного критерия по количественному измерению конкурентоспособности продукции. Но, учитывая наличие критерия по высшему качеству с отражением в нем закона створа, а также критерия экономической оптимальности, можно получить некоторый обобщенный и безразмерный количественный показатель конкурентоспособности. При всей своей условности он поможет в первом приближении найти местоположение данной продукции на рынке среди аналогичных товаров, позволит в некоторой мере прогнозировать вероятную перспективу итогов конкуренции.

К одной из причин низкой конкурентоспособности, например российской металлопродукции, относится высокая энергоемкость производства. Предприятия отрасли потребляют свыше 24% объема производства электроэнергии. Низок и экономический показатель вследствие высоких железнодорожных тарифов.

На основании анализа смыслового содержания и количественного определения критериев прогрессивности технологий представляется вероятной такая последовательность аттестации их с позиций мирового уровня развития отрасли каждой разновидности строительных материалов.

1. Выполнение двух подготовительных операций: а) анализ изучаемой технологии с целью выявления главных показателей прогрессивности, с помощью которых возможно охарактеризовать предприятие; б) нахождение аналога (передовой фирмы, передового предприятия, завода и др.) в мировой практике и составление обзора его деятельности с учетом принятых главных показателей прогрессивности.
2. Фиксация изначального уровня симплексных величин, относящихся к каждому главному показателю прогрессивности, принятому по данной технологии на изучаемом предприятии (в проекте, в научной работе и т.п.).
3. Анализ наиболее вероятных оптимизирующих факторов и выделение из них некоторого минимума основных, с помощью которых предполагается совершенствовать технологию предприятия.
4. Работы по реализации каждого оптимизирующего фактора с последующим определением симплексных величин с целью вычисления критерия оптимальности в первом приближении (по сумме симплексов).
5. Соответствующее корректирование значений критериев оптимальности путем решения уравнений регрессии, составленных с помощью математического планирования эксперимента (математического моделирования), при необходимости получить более высокую точность с учетом синергического эффекта при реализации оптимизирующих факторов. Варьируемыми значениями при этом являются симплексные величины в их вероятных пределах.

6. Полная характеристика, получаемая суммированием критериев оптимальности, каждый из которых был обусловлен симплексными величинами в пределах принятого в начале исследования показателя прогрессивности. Главная или полная характеристика технологии может быть получена также в виде среднего значения путем соотнесения ее суммарной величины к общему числу принятых показателей прогрессивности.

Возможна и более сокращенная методическая система за счет допустимого уменьшения числа критериев оптимальности и оптимизирующих факторов, вводимых в характеристику технологии и количественную оценку степени ее прогрессивности.

На первой стадии исследований можно ограничиться половиной показателей прогрессивности: по расходу природного сырья, по производительности, по количеству энергозатрат — тепловых и электроэнергии. Оценки производятся из расчета на нормальную или увеличенную единицу продукции, изготовляемой на предприятии по изучаемой технологии. При этом соблюдаются два обязательных условия: продукты должны быть высшего качества и конкурентоспособными; производство по выпуску продукции должно обеспечивать экологизацию технологии как неперменного элемента гуманизации, оптимальных условий для жизни и деятельности человека. Остальные критерии оптимальности на этой первой стадии исследований могут быть опущены, но не потому, что они являются как бы менее значимыми.

Можно также пойти на максимально возможное сокращение числа факторов и, следовательно, симплексных величин. Более того, на первой стадии возможно ограничиться только итоговыми данными о влиянии группы факторов на принятый показатель прогрессивности технологии.

Таким образом, всемерное повышение уровня прогрессивности технологий с использованием принятого комплекса оптимизирующих факторов и их реализации на производстве составляет существенную часть введения в практическую технологию. При реорганизациях и разработках новых производств этой части уделяется значительное внимание с возможным предварительным ее программированием. Однако в заключение следует отметить, что каждая прогрессивная технология, какой бы совершенной она ни была, становится через больший или меньший период времени менее прогрессивной, по одному, двум или нескольким критериям. Возможен, конечно, и обратный процесс под влиянием реализации профилактических факторов прогрессивности. Поэтому изучение реального уровня прогрессивности технологии действующего предприятия (или фирмы) является неперменным условием их постоянного совершенства.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ПРАКТИКА СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ (СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ)

Практика в строительном материаловедении имеет не только приоритетное значение, но и предусматривает первоначальное ее изложение. В ней раскрывается, во-первых, сущность производства природных строительных материалов без химической переработки сырья — лесных и горных пород; во-вторых, сущность производства искусственных строительных материалов и изделий с привлечением для этих целей химической переработки природного сырья и побочных продуктов промышленности, сельского хозяйства, горно-обогатительных комбинатов; в-третьих, сущность технических ценностей готовой продукции этих производств, направляемой для реализации ее в строительстве и технологиях строительного производства, а также в отраслях по изготовлению строительных изделий и конструкций. Первое стадийное изложение практики строительного материаловедения было особенно характерно для второго исторического этапа развития этой науки, и оно проводилось под рубрикой строительных материалов. В данной книге по методическим соображениям представилось более целесообразным изменить последовательность изложения теории и практики, но с неизменным сохранением приоритета практики.

А. ПРИРОДНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Глава 7

Древесина и древесные строительные материалы

7.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Древесина относится к весьма распространенному строительному материалу, применяемому с глубокой древности. Благоприятной отличительной особенностью этого материала всегда остается высокая прочность и упругость при сравнительно малой плотности, что обеспечивает невысокую массу изготавливаемых из него конструкций при относительно большом коэффициенте конструктивного качества. К тому же такие конструкции обладают надежной химической стойкостью в средах, которые агрессивны по отношению к стали и бетону. Имеется ряд и других положительных качеств у древесины как строительного материала: легкость технологической обработки с приданием изделиям практически любых форм; надежная склеиваемость и хорошая гвоздимостью; малая теплопроводность. Следует также отметить достаточно широкое распространение лесных пород для получения качественной деловой древесины, главным образом, пиломатериалов. Немалую пользу приносят и побочные продукты деревопереработки и лесопиления — стружка, дробленка, опилки и др. Их используют в качестве компонентов различных строительных конгломератов — древесностружечных плит, древесноволокнистых плит, арболита, ксилолита и т. п. У древесины имеются и серьезные недостатки — анизотропность, легкая возгораемость, подверженность к загниванию в переменнo-влажностных условиях, повышенная гигроскопичность с возможным короблением и разбуханием, но они преодолеваются техническими средствами: пропиткой антисептиками, введением антипиренов, прессованием, склеиванием тонких элементов и др. Кроме того, возможно создание благоприятных эксплуатационных условий для соответствующих строительных конструкций. Поэтому в России, богатой лесными массивами, древесина всегда была и остается одним из основных строительных материалов, особенно для жилищного строительства. Используют ее при устройстве перекрытий, стен, строительных ферм, полов, дверных и оконных заполнений и др.

Наша страна богата лесами, особенно в северных регионах, некоторых областях Сибири и Дальнего Востока. И тем не менее действует нормированное ограничение использования древесных пород. Под вырубку лес направляется в объеме не выше среднего годового прироста древесины, что составляет примерно 1% всех лесных запасов страны. В таком ограничении не последнюю роль играет экологический фактор, поддерживающий атмосферное пространство в благоприятных условиях для жизнедеятельности организмов. В строительстве используют хвойные и лиственные породы. Здесь важно отметить, что между породами древесины имеются не только различия, но еще в большей мере сходство по составу, структуре и свойствам. Различия же не имеют принципиального характера, хотя при использовании пород в строительстве требуется учитывать их специфические особенности.

7.2. СОСТАВ, СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

Древесина состоит в основном из органических веществ, к которым полностью приложимы законы органической химии. Она является продуктом растительного происхождения и как биологический объект складывается из клеток. Стенки клеток древесины на 99% сложены из органических соединений, представленных у хвойных пород примерно на 70% углеводами, а у лиственных — на 80%. Углеводы, как известно, представляют группу природных веществ, образованных тремя элементами: углеродом, водородом и кислородом. К обширной группе этих веществ принадлежит сахар, а примером сравнительно простых углеводов может служить глюкоза (состав молекулы которой выражается формулой $C_6H_{12}O_6$), иначе называемая моносахаридом. Молекулы простых Сахаров способны соединяться в растениях под влиянием ферментов в более крупные образования, например дисахарид: $2 C_6H_{12}O_6 = C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O$, а при большом количестве молекул моносахарида — в полисахариды, например с образованием крахмала $(C_6H_{10}O_5)_n$ или целлюлозы с тем же выражением молекулы, но при более высоком значении n , чем у крахмала.

В углеводную часть древесины входит целлюлоза как ее основной компонент по объему в стволе дерева и нецеллюлозные полисахариды, именуемые гемицеллюлозами. Всю углеводную часть в целом называют холоцеллюлозой. Ее можно выделить из древесины в виде волокнистого материала обработкой окислителями (кислотами).

Около 30% древесины составляют вещества ароматической природы, известные под названием лигнина.

Углеводы и лигнин — это высокомолекулярные вещества, или полимеры. На них распространяются закономерности, характерные для этих соединений, причем они находятся в теснейшей взаимосвязи и образуют единую высокоорганизованную полимерную систему древесинного вещества.

К небольшой части древесины (2—4%) относятся экстрактивные вещества, которые не являются составляющими клеточной стенки. Они способны лишь пропитывать стенки клеток, а в основном содержатся в их полостях и в межклеточном пространстве. В отличие от углеводов и лигнина, экстрактивные вещества — низкомолекулярные соединения.

Следует несколько подробнее остановиться на характеристике главных структурных элементов древесины. Они, в совокупности с порами, капиллярами, контактными зонами и другими элементами микро- и макроструктуры, определяют основные свойства древесного материала.

Целлюлоза может быть выражена эмпирической формулой $[C_6H_{10}O_5]_n$ или в другом виде $[C_6H_7O_2(OH)_3]_n$, где n — степень полимеризации, которая у древесной целлюлозы достигает значений от 300 до 6000 и более. Она представляет собой линейный гетероцепной стереорегулярный¹ однородный полимер, имеющий большое число гидроксильных групп OH, образующих водородную связь. Этот тип химической связи между водородным атомом гидроксильной группы одной цепи и кислородным атомом гидроксильной группы соседней цепи придает повышенную жесткость полимеру, так как «стягиваются», ориентируются цепные молекулы в целлюлозных волокнах.

Кроме водородных связей, для целлюлозы характерно также внутри- и межмолекулярное взаимодействие (т. е. силами Ван-дер-Ваальса), что, наоборот, уменьшает степень жесткости, и молекулы целлюлозы могут принимать различные конформации (расположения). Являясь основным веществом древесины, целлюлоза образует в структурном отношении слоистую клеточную оболочку (стенку), способную при механической обработке распадаться на тонкие целлюлозные волокна-фибриллы, а при химической — на микрофибриллы. Фибрилла имеет кристаллическую структуру, так как для нее

¹ В стереорегулярных полимерах все звенья расположены в пространстве в определенном порядке.

типичным является регулярное расположение молекул, характерное для молекулярной кристаллической решетки. Микрофибриллы также в основном сохраняют кристаллические (ориентированные) области. В некоторой части кристаллическая фаза перемежается с хаотическим (аморфным) расположением макромолекул, в ней отсутствует четко выраженная ориентация в микрофибриллах, а цепи значительно короче. Эту часть именуют гемицеллюлозой. Степень полимеризации макромолекул гемицеллюлозы составляет всего 100—200. Короткие цепи нередко попадают среди кристаллических участков целлюлозного волокна, и тогда они достаточно прочно связываются с целлюлозой, образуя целлюлозаны, но оставаясь по существу гемицеллюлозой (ксиланы, маннаны).

Древесные целлюлозные волокна имеют спиральную структуру и содержат примерно 55—65% кристаллической и 25—35% аморфной (гемицеллюлозной) части, причем у хвойных пород аморфной части меньше, у лиственных пород — больше (28—35%). Согласно другой теории, содержание кристаллической фазы в природной целлюлозе значительно больше, тогда как аморфной — не выше 5—10% и ее относят к дефектам упорядоченности. В этом случае полагают, что целлюлоза является однофазным кристаллическим веществом. Так или иначе, но главное, что необходимо учитывать, древесина — высококристаллическое вещество, имеющее форму продольных спиральных волокон, которые в деловой древесине выполняют роль своеобразного «армирующего» компонента, повышающего прочность материала на растяжение, чему способствует также их упорядоченное расположение.

Лигнин как другой структурообразующий компонент древесины — тоже природный полимер, представляет собой высокомолекулярную ароматическую часть, количество которой в древесине хвойных пород составляет 28—30%, а в древесине лиственных пород — 18—24%. В древесине он был открыт более 145 лет назад, но его весьма сложное строение до сих пор остается не полностью выясненным. Полагают, что это смесь нерегулярных разветвленных полимеров сетчатой структуры. Присутствие лигнина устанавливают по цветным реакциям. От целлюлозы отличается повышенным содержанием углерода — 60—65% по сравнению с 44% в целлюлозе, что обусловлено его ароматической природой. Из девяти атомов углерода, составляющих структурную единицу (фенилпропановую) лигнина, шесть принадлежат ароматическому кольцу. В химическом отношении лигнин — реакционно-способный полимер. По сравнению с целлюлозой лигнин обладает меньшей химической стойкостью, легче окисляется.

Лигнин — аморфное вещество; им обогащаются клеточные стенки с эффектом одревеснения. Он содержится в срединной пластинке клеточной стенки, но большая его часть находится во вторичной стенке (слое). Обнаруживается лигнин в этих двух слоях стенки по окрашиванию в красный цвет при воздействии на клеточные стенки химическим реагентом (солянокислородным флороглюцианом). Электронная микроскопия позволила, однако, не только по цветной реакции, но и на снимках увидеть, что лигнин заполняет также и межклеточные пространства. Своим присутствием он придает некоторую гидрофобность, но в целом она незначительна, и древесина относится к гидрофильным материалам, особенно древесина лиственных пород.

Оба основных компонента древесины — целлюлоза и лигнин — взаимодействуют между собой. Характер их взаимодействия еще полностью не раскрыт. Вначале предполагалось наличие чисто механической связи лигнина с углеводами в стенках (слоях) клетки. Такая теория называлась инкрустационной. Позднее было установлено, что невозможно ни извлекать углеводы из древесины без одновременного частичного удаления лигнина, ни полностью удалить лигнин из древесины без удаления некоторого количества углеводов. Очевидно, что это возможно только при их химическом взаимодействии, тем более что из древесины удалось выделить лигноуглеводные комплексы. Большинство исследователей склоняется к предположению о существовании химической связи лигнина с гемицеллюлозой (ксиланом, маннаном и другими полисахаридами), хотя

поддерживается мнение также о возможной химической связи лигнина с целлюлозой. В целом, однако, часть лигнина находится в древесине в свободном состоянии.

Экстрактивные вещества в отличие от главных компонентов извлекаются нейтральными растворителями — водой, обычными органическими растворителями. Хотя их немного, но они придают древесине цвет, запах, вкус, иногда токсичность, помогают дереву сопротивляться гниению, поражению грибами и пр. Среди экстрактивных веществ — смолы и смоляные кислоты, таниды (дубители), эфирные масла, красители, камеди, фитостерины, белки и пр. Содержание смол в лиственных породах до 1%, а в хвойных может быть до 20%. В каждой породе присутствуют только некоторые экстрактивные вещества, по-разному распределяясь внутри дерева, например фенольные вещества — в ядровой части, а сахара, жиры и др. — в заболонной древесине. Имеется небольшая доля и минеральных веществ (до 1%), поступающих из почвы через корневую систему и проводящие ткани.

Таким образом, древесина складывается из двух основных компонентов с присутствием небольших количеств других веществ, по-видимому, мало влияющих на формирование общей структуры.

Структура древесины в первом приближении представляет собой конструкционное сочетание целлюлозы с лигнином. Волокна целлюлозы обладают высокой прочностью на разрыв, но легко изгибаются (рис. 7.1). Лигнин объединяет их в единое целое с помощью водородных и ван-дер-ваальсовых сил связи и когезии, поэтому в совокупности древесина — по существу природный органический материал с конгломератным типом структуры, в котором имеются матричная пространственная сетка из лигнина и кристаллический волокнистый наполнитель в виде целлюлозы. Эта структура хорошо, например, видна на микроснимке, полученном американским ученым Э.Келли для среза осины при увеличении в 11000 раз (рис. 7.2). Темная полоса — лигнин, менее темная — стенка целлюлозной клетки и светлая область — полость клетки.

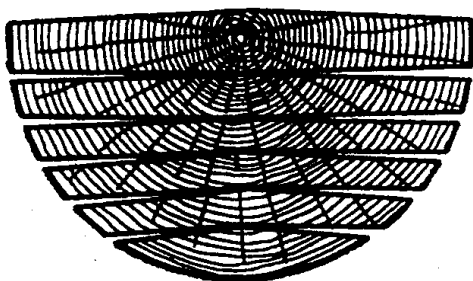


Рис. 7.1. Коробление древесины при высыхании (с появлением трещин усушки)



Рис. 7.2. Электронная микрофотография среза осины (11000 х по Э. Келли)

Подобно искусственным, конгломератам, древесина содержит капилляры и поры различных размеров; в период жизни дерева они имеют большое значение для передвижения воды и питательных соков, их накопления и пр. Крупные капилляры являются полостями и порами стенок, капилляры и поры тонкие и мельчайшие находятся между фибриллами, микрофибриллами и внутри микрофибрилл. Если в крупных капиллярах и порах невелика удельная площадь внутренней поверхности, составляя, например, у ели $0,2 \text{ м}^2/\text{г}$, то у мельчайших пор она очень большая, например у ели при диаметрах капилляров $10 \cdot 10^{-8}$ — $10 \cdot 10^{-7}$ см (от 10 до 100 А) удельная площадь их поверхности составляет до $300 \text{ м}^2/\text{г}$. Такое различие капилляров отражается на характере контакта их с водой. Крупные капилляры могут заполняться водой, которая мало влияет на состояние древесины и ее качество (механические свойства) как строительного материала. Эта влага сравнительно легко приходит в капилляры и поры, особенно при контакте дерева с водой, заполняет полости и может составлять до 100—200% к массе

абсолютно сухой древесины, но она сравнительно быстро и легко удаляется из них при сушке. Тонкие поры и капилляры заполняются не только при контакте с водой, но и в условиях влажного воздуха в связи с гигроскопичностью древесины и по законам капиллярных сосудов. Гигроскопическая влага сорбируется на стенках клеток, частично переходит в коллоидно-связанную с веществом дерева. Предельное насыщение древесины гигроскопической влагой составляет 25—35% (в среднем 30%) к массе абсолютно сухой древесины, называемое пределом насыщения. Насыщение гигроскопической влагой до этой предельной точки сопровождается набуханием древесины, изменением (ухудшением) ее физических и механических свойств. Увеличение влаги свыше 30%-ного ее содержания на механических свойствах древесины почти не отражается; не увеличивается и объем ее за счет набухания.

При сушке древесины трудно испаряется гигроскопическая (связанная) влага от клеточных стенок насыщения- волокон, причем объем древесины уменьшается в связи с усадкой и уплотнением клеточных оболочек. Особенно трудно удаляются последние 4—6% гигроскопической влаги, так как она ориентированно закреплена (адсорбирована) в монослое молекулами целлюлозы. Возникают водородные связи между гидроксильными группами целлюлозы и водой, тогда как другая большая часть гигроскопической влаги (20—25%) находится под влиянием капиллярной конденсации. С приближением при сушке к температуре 105°C масса древесины сохраняет постоянное значение, что и принимают за абсолютно сухое состояние древесины. Абсолютно сухая древесина состоит из двух компонентов — древесинного вещества и воздуха. Фактически около 1% гигроскопической влаги в абсолютно сухой древесине сохраняется, но за счет относительно прочных водородных связей она не снижает ее качественных показателей. Дальнейшее повышение температуры вызывает более или менее глубокое разложение целлюлозы — деструкцию, особенно в присутствии воздуха и влаги. При умеренном нагревании (120—180°C) изменяется цвет целлюлозы, снижается ее прочность, а при более высокой температуре (230—240°C) протекают химические реакции с изменением элементарного состава целлюлозы. При температуре, близкой к 300°C, структура переходит из кристаллической формы в аморфную, а при дальнейшем повышении температуры образуются целлюлозный уголь и жидкие продукты распада (уксусная кислота, ацетон, формальдегид, муравьиная кислота и др.). Лигнин более устойчив к термолизу, чем целлюлоза, за счет его ароматического строения. Однако и он к моменту обугливания целлюлозы подвержен экзотермическому распаду с потерей своих первоначальных свойств. Следовательно, при нагревании выше 105—110°C непрерывно протекают процессы деструкции, а древесина сравнительно быстро теряет свои высокие физико-механические свойства, которые она имела в абсолютно сухом состоянии.

Кинетику изменения показателей свойств древесины по мере ее высыхания можно изобразить графически в системе прямоугольных координат. Для этого на параллельно расположенных осях ординат необходимо отложить в соответствующих масштабах различные показатели свойств (на рисунке условно принята одна ось ординаты для всех свойств), а на оси абсцисс — влажность, еще лучше структурный параметр в виде, например, отношения объема V свободной влаги, равного M_B/ρ_B или гигроскопической $M_{г.в}/\rho_B$ отнесенных к суммарной площади стенок пор и капилляров, постоянной для данной породы дерева. Очевидно, что отношение $V/A_{\text{сум}} = \delta$, где δ — усредненная толщина пленки свободной или гигроскопической влаги; ρ_B — плотность воды.

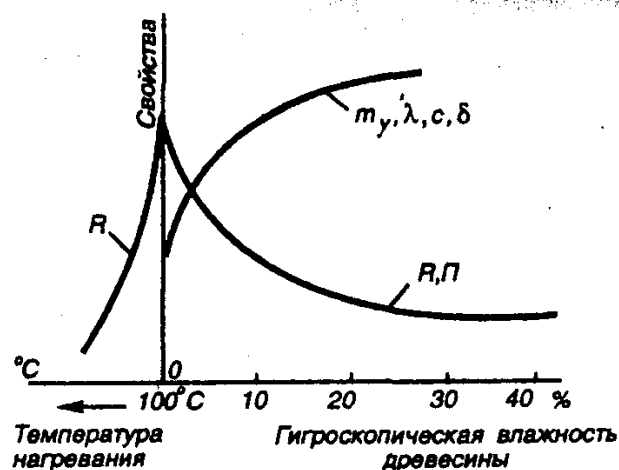


Рис. 7.3. Проявление закона створа в древесине при отсутствии влаги: R — прочность, m_v — средняя плотность, λ — теплопроводность, c — электропроводность, δ — толщина пленки воды, Π — пористость

По мере испарения свободной влаги в свежесрубленной древесине, когда ее влажность составляет обычно от 40 до 100% и выше, показатели свойств остаются постоянными до предела насыщения волокон. При постепенном высушивании в пределах содержания гигроскопической влаги с утоньшением полимолекулярных слоев (δ) воды на развитой поверхности тончайших капилляров и пор показатели свойств непрерывно улучшаются. К моменту высыхания, когда влажность становится равной 1% и меньше, а гигроскопическая вода достаточно прочно химически связана с целлюлозой в монослоях, причем отношение $V/A_{\text{сум}}$ принимает минимальное значение, близкое к нулю, тогда показатели свойств становятся экстремальными: прочность, выражающая любые ее значения (при сжатии, растяжении и т. п.), — наибольшей; упругость — также наибольшей, тогда как пластичность и общая деформация — наименьшими, теплопроводность и электропроводность — наименьшими (в сухом состоянии древесина является хорошим диэлектриком); пористость (Π), коэффициент диффузии при постоянной температуре — наибольшими, плотность — наименьшей и т. д. (рис.7.3). Числовые значения этих экстремумов получают экспериментальным путем при испытании образцов или расчетным, применяя некоторые известные зависимости. В них значение влажности для получения экстремальной величины принимается равным нулю ($W = 0$).

На левой ветви получаемой экстремальной кривой показаны значения свойств по мере развития деструкционных процессов при дальнейшем повышении температуры древесины (свыше 105°C).

Из графика следует, что при определенном наборе структурных параметров в абсолютно сухой древесине закономерно возникает комплекс экстремальных значений тех физических и механических свойств, которые непосредственно связаны со структурой. Такой комплекс экстремумов согласно закону створа возможен только при оптимальной структуре.

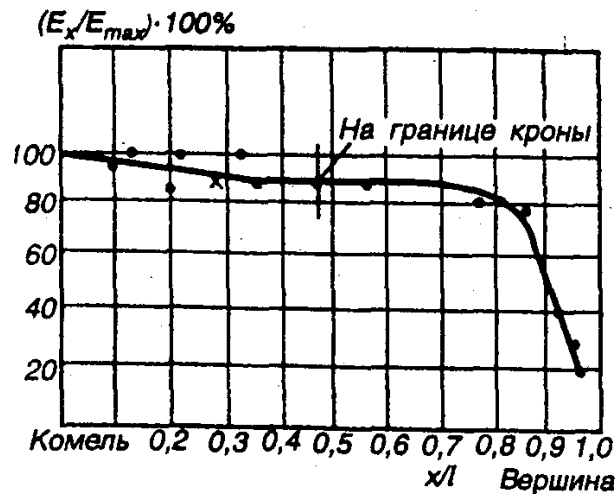


Рис. 7.4. Результаты экспериментального определения модуля упругости E при изгибе древесины сосны на растущем дереве (по Юлинену): x — расстояние от комля; l — высота ствола

Следовательно, под влиянием внешних и внутренних детерминантов в период роста дерева происходит постепенная оптимизация структуры древесины эволюционным путем. К внешним, воздействовавшим на растущее дерево, следует отнести: силовые — от ветровой нагрузки и массы кроны, утяжеленной атмосферными осадками; тепловые — от переменной температуры окружающей среды; воздействие влаги, солнечного света и др. К внутренним детерминантам относятся: перемещение влаги с растворенными минеральными веществами из почвы; перемещение и создание запаса питательных веществ; процесс фотосинтеза в кроне и др. Реальные условия развития дерева не только благоприятствовали его росту, но и вызвали необходимость в приспособляемости к механическим напряжениям, особенно древесных волокон. Так, сопротивляемости ветровым нагрузкам благоприятствовало: развитие слоистого строения древесины с правильным чередованием прослоек более мягкой весенней и более жесткой летней древесины; повышение модуля упругости древесины ствола от вершины к комлю (основанию) (рис. 7.4), сбег толщины ствола от комлевой части его к вершине при высокой прочности на растяжение корней. Прочные наружные слои ствола при меньшей прочности сердцевины обеспечивают дереву надежную сопротивляемость большим вертикальным нагрузкам от массы кроны. В результате нормального роста древесина хвойных и лиственных пород набирает комплекс анатомических элементов, общим для которых является упорядоченность волокнистой структуры и клеточного строения древесины, утончаются стенки-прослойки матричной части из лигнина, наступает в процессе значительной кристаллизации целлюлозы и, отчасти, гемицеллюлозы общая упорядоченность расположения молекул с анизотропией свойств по главным структурным направлениям, формируется оптимальная структура с соответствующей закономерностью створа с комплексом экстремальных значений свойств. В этом проявляется структурная детерминация развития растений.

7.3. АНАТОМИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ

Для полной характеристики древесины и древесных строительных материалов следует раскрыть еще одну сторону структуры и свойств этого биологического объекта растительного происхождения: взаимосвязь анатомического строения с физико-химическими и физическими свойствами древесины, тем более что здесь прослеживаются различия между хвойными и лиственными породами, как на уровне микро-, так и макроструктуры. Принято изучать три основных разреза ствола (рис. 7.5).

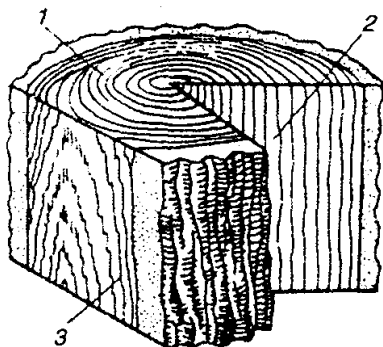


Рис. 7.5. Основные разрезы ствола: 1 — торцовый; 2 — радиальный; 3 — тангенциальный

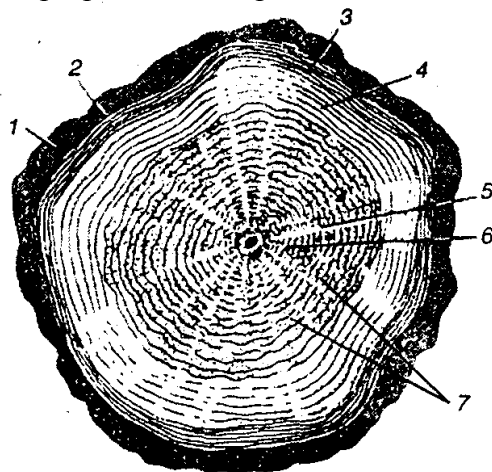


Рис. 7.6. Торцовый разрез ствола: 1 — кора; 2 — луб; 3 — камбий; 4 — заболонь; 5 — ядро; 6 — сердцевина; 7 — сердцевинные лучи

В торцовом разрезе ствола дерева выделяют (рис. 7.6): сердцевину (сердцевинная трубка) — примерно в центре ствола размещается вдоль его оси, которая является рыхлой первичной малопрочной тканью; собственно древесину, слагаемую из концентрически расположенных годовичных слоев с включением в каждый из них весенней и более плотной летней древесины; камбий — тончайший слой из полностью живых клеток, способных к росту и делению на большую часть, откладываемую в сторону древесины, и меньшую — в сторону от центра, где расположен следующий слой в виде луба; луб является внутренним слоем коры (флоэмы) и граничит с внешним слоем ее, называемой коркой (темного цвета). На долю ствола приходится 70—90% всего объема дерева; остальную часть составляют крона и корневая система. Кора составляет от 6 до 25% объема ствола, остальная часть его служит древесиной, в которой наблюдается светлое периферическое кольцо — заболонь и более темная центральная часть — ядро. Камбиальный слой находится между заболонью и лубом. Все эти части составляют макроструктуру древесины. У некоторых древесных пород (дуб, бук, клен и др.) на торцовом сечении можно видеть узкие радиально расположенные полосы, которые называются сердцевинными лучами 7.

В породах может отсутствовать ядровая часть, и тогда породы именуются заболонными (береза, липа, клен, граб и др.). В других породах заболонь имеет цвет центральной части ствола, причем последняя остается более сухой; такие породы называются спелодревесными (ель, пихта, осина, бук и др.).

Более подробное строение древесины хвойных и лиственных пород изучается с помощью микроскопа и специальных срезов слоев древесины.

Выше отмечалось, что древесина состоит в основном из клеток. Их можно разделить на два типа: прозенхимные и паренхимные. Прозенхимные имеют длину во много раз большую, чем их ширина; они придают древесине волокнистое строение, оставаясь, как правило, уже отмершими. Среди этих клеток различают трахеиды, клетки либриформа и сосуды. Паренхимные клетки — короткие, имеют примерно одинаковую длину и ширину, являются живыми. Если в живой клетке имеется оболочка (клеточная стенка),

внутри которой расположены протоплазма (протопласт) и ядро, то в отмершей в процессе роста дерева протопласт частично расходуется на утолщение стенки, частично высыхает вместе с ядром, оставляя полость, которая заполняется водой или воздухом, а иногда экстрактивными веществами. Естественно, что в срубленном дереве живые клетки быстро умирают, и оно состоит из омертвевших клеток, т. е. из клеточных стенок (оболочек).

Клетки в древесине имеют различное функциональное значение. Одни из них выполняют функции проводящих клеток, другие — опорных или механических, третьи — запасующих, четвертые — образовательных (расположены в камбиальном слое), пятые — ассимиляционных (находятся в листве и хвое и благоприятствуют образованию питательных веществ), шестые — покровных (в корке дерева).. Клетки, имеющие одинаковое строение и выполняющие одну и ту же функцию, образуют ткани. Особо выделяют ткани проводящие, механические и запасующие, что соответствует первым трем функциям их клеток.

Древесина хвойных пород имеет относительно простое строение (рис. 7.7). Она состоит из клеток почти одного типа — трахеид (рис. 7.8). К ним относятся мертвые веретенообразные клетки длиной от 1,5 до 5 мм со стенками разной толщины и с полостями различных размеров. Трахеиды весенней древесины имеют широкие полости и тонкие стенки, а осенней — более узкие полости и толстые стенки. У весенних трахеид, выполняющих функции водопр-водящих клеток, отношение диаметра к длине составляет 1:100, у осенних — 1:400. В стенках трахеид имеются поры, через которые клетки общаются между собой и при помощи которых содержимое живых клеток соединяется в одно целое.

Паренхимные клетки составляют живую ткань хвойной древесины; находятся, главным образом, в сердцевинных лучах и, следовательно, выполняют функции запасующих питание (крахмал и жиры) для потребления весной, а также в небольшом количестве в лубе, поблизости от камбия (вертикальная паренхима). Кроме того, паренхимные клетки, образуя межклеточные каналы, как бы выстилают поверхность смоляных ходов, столь характерных для хвойных. пород. Такие ходы, располагаясь вертикально и горизонтально, образуют единую смолоносную систему, что в конечном итоге благоприятствует повышению стойкости древесины хвойных пород. В целом, однако, объемная доля паренхимной ткани в хвойной древесине составляет 3—5%, так как часть запасов питания хранится в хвое, где не имеется паренхимных клеток.

Лиственные породы имеют более сложное анатомическое строение (рис. 7.9). Проводящими (водопроводящими) клетками (элементами) служат сосуды длинные трубки шириной 0,02—0,5 мм (рис. 7.10). В весенней древесине они более широкие и их можно иногда заметить невооруженным глазом. Стенки сосудов характерны утолщением кольчатой, спиральной или сетчатой формы, что придает стенкам повышенную прочность. Механические клетки, и соответственно механическая ткань, называемые у лиственных пород либриформом, заметно отличаются своей веретенообразной формой, толстыми стенками с щелевидными порами, узкими полостями клеток, имеют сравнительно небольшие длину (0,3—0,8 мм) и диаметр (0,1—0,2 мм). Все клетки либриформа являются мертвыми, и лишь паренхимные клетки как и в хвойных породах, образуют сердцевинные лучи, как запасующие и проводящие питательные вещества в радиальном направлении при объемной доли их около 10%, т. е. в 2—3 раза больше, чем в хвойных породах.

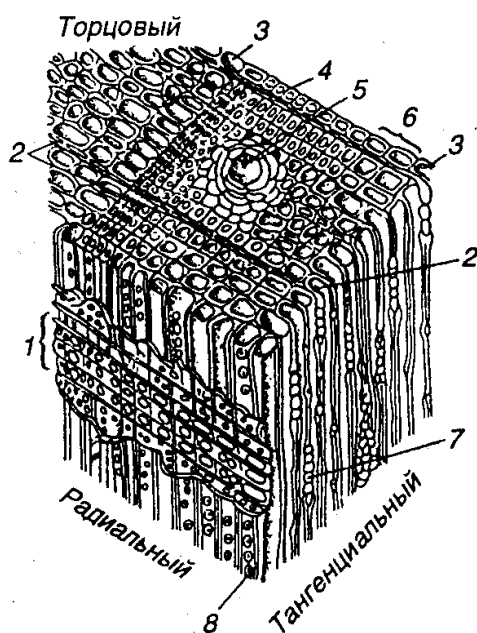


Рис. 7.7. Микроструктура древесины сосны: 1 — сердцевинный луч в радиальном разрезе; 2 — многорядный луч; 3 — годичный слой; 4 -поздние трахеиды; 5 — вертикальный смоляной ход; 6 — ранние слои древесины; 7 — сердцевинный луч в тангенциальном разрезе; 8 — окаймленная пор

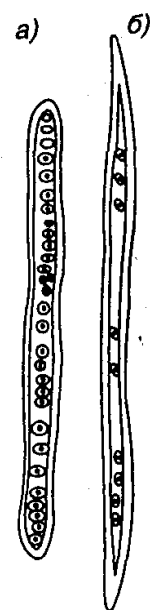


Рис. 7.8. Трахеиды ранней (а) и поздней (б) древесины сосны

Выше были отмечены шесть функций клеток, но при кратком описании анатомического строения древесины были описаны лишь три из них, хотя три других являются не менее значимыми. Образовательная функция — живые клетки камбия образованы тонкими оболочками и наполнены протоплазмой и ядром. В процессе роста древесины клетка камбия делится на две неравные части с возникновением одной новой активной камбиальной клетки; вторая становится либо клеткой древесины, либо — луба. В обоих случаях после отделения клетки от камбиального слоя в ней начинается лигнификация с отложением лигнина, повышением ее гидрофобности и одревеснения, затем она отмирает. Процесс роста древесины неравномерный, что легко устанавливается по плотности и ширине годичных слоев (годичных колец): поздняя древесина (осенняя) — плотнее и темнее весенней, а ширина слоев зависит от породы древесины. При необходимости по этим признакам можно определить процент содержания поздней древесины; чем он выше, тем прочнее древесина как строительный материал.

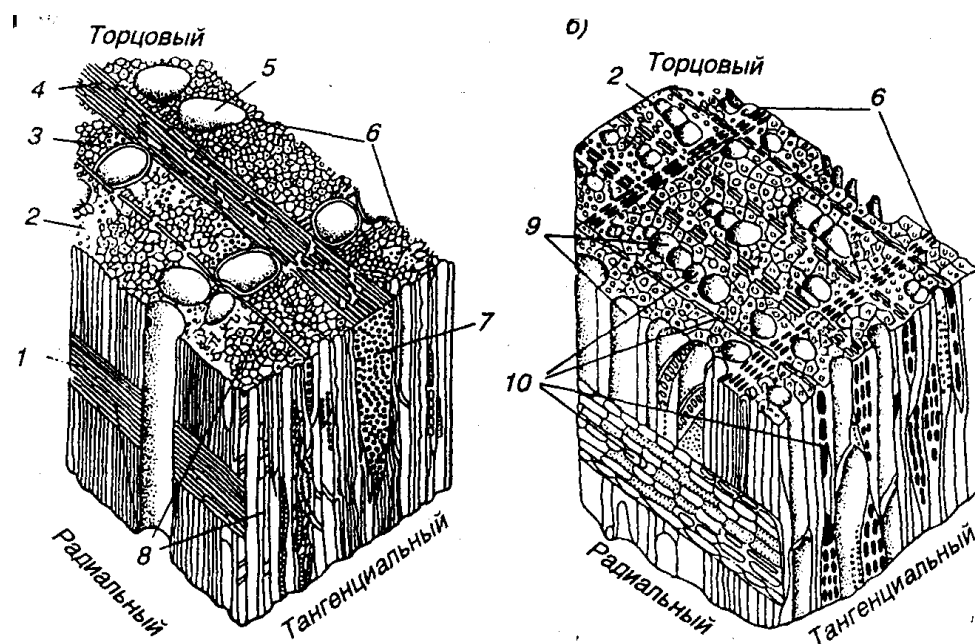


Рис. 7.9. Микроструктура древесины лиственных пород:

а — дуба; *б* — березы; 1 — сердцевинный луч; 2 — либриформ; 3 — мелкие сосуды; 4 — широкий сердцевинный луч в торцовом (поперечном) разрезе; 5 — крупный сосуд; 6 — годичный слой; 7 — широкий сердцевинный луч в тангенциальном разрезе; 8 — узкий сердцевинный луч; 9 — сосуды; 10 — сердцевинные лучи в различных разрезах

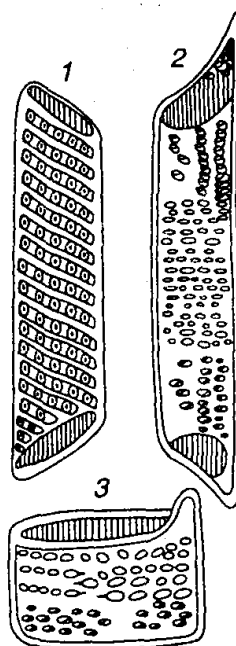


Рис. 7.10. Сосуды лиственных пород: 1 — липы; 2 — бука; 3 — дуба

Ассимиляционная функция клеток заключается в усвоении клетками зеленых листьев и хвои внешних веществ (воды, углекислоты) с образованием углеводов в результате фотосинтеза, т. е. при помощи лучистой (солнечной) световой энергии, поглощаемой хлорофиллом. Последний находится в виде хлорофилловых зерен в клетках листа, являясь в нем красящим веществом, или пигментом, придающим листьям зеленую окраску. Сущность процесса ассимиляции раскрыта великим русским ученым К.А. Тимирязевым (1843—1920). Ее схематически можно представить в следующем виде (рис. 7.11): листья поглощают из атмосферы углекислый газ CO_2 ; хлорофилловые зерна в листьях на солнечном свете поглощают продиффундировавший углекислый газ CO_2 и выделяют

кислород в воздух; оставшийся в листьях углерод вступает во взаимосвязь с молекулами воды, проникшей к кроне дерева из почвы по сосудам заболонного слоя древесины; в результате такого взаимодействия образуется промежуточное вещество — формальдегид CH_2O ; шесть молекул газообразного формальдегида (с резким неприятным запахом и вкусом) в результате фотосинтеза и полимеризации (т. е. соединения друг с другом) образуют новую молекулу вещества, именуемого глюкозой: $\text{CH}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$; глюкоза из листьев по сосудам переходит в различные части древесины и отлагается там в запас; под влиянием молекул воды и ферментов n молекул глюкозы переходят в одну молекулу крахмала, а именно: $n\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 = n\text{H}_2\text{O} + (\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$. Величина индекса n — степени полимеризации крахмала — высокая, но не до конца пока выясненная по своему числовому значению. Однако она может оказаться еще больше с возникновением макромолекулы целлюлозы (клетчатки) со степенью полимеризации до 6000 и выше. Из таких макромолекул целлюлозы в процессе роста дерева слагаются стенки клеток древесины. Немаловажную роль в росте и сохранности дерева имеют функциональные клетки — покровные. Они возникают при делении клеток камбия с отложением их в сторону луба, а затем полностью отмирают и переходят, как структурообразующий элемент, во внешний слой коры дерева, т. е. в корку. Корка предохраняет дерево — древесину, камбиальный слой и луб (проводящий питательные вещества от кроны в ствол и корневую систему) — от механических повреждений, вредного воздействия внешней среды, низких температур или резких температурных колебаний.

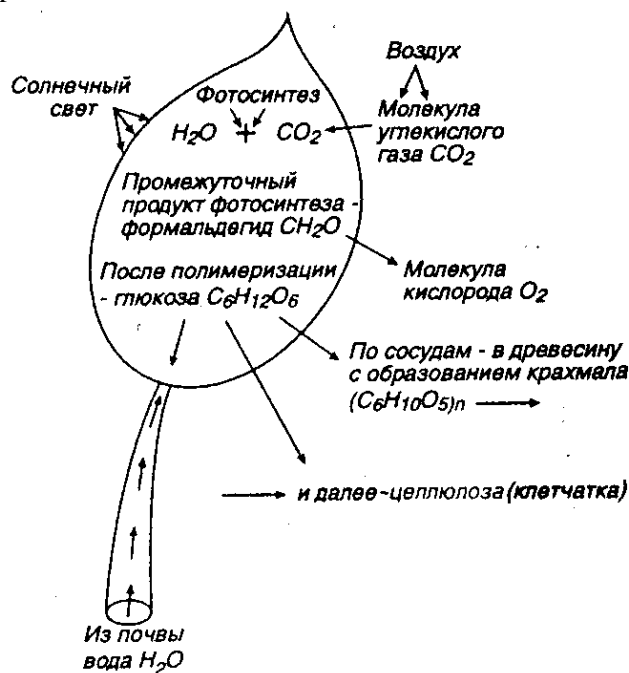


Рис. 7.11. Схема ассимиляции с фотосинтезом в зеленых листьях дерева (по К.А. Тимирязеву)

7.4. КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Древесина хвойных и лиственных пород обладает комплексом свойств, уровень показателей которых обусловлен видом древесной породы, анатомическим строением и составом древесины, степенью оптимизации общей структуры древесного материала, сложившейся в процессе роста дерева в реальных условиях. Особенно значительное влияние на уровень показателей свойств оказывает капиллярное пространство в древесине и проникание воды в капилляры. Одни из них (первого порядка) бывают относительно крупными, хотя и изменяются с возрастом дерева, — межклеточное пространство, полости клеток, поры в стенках клеток. Другие значительно меньшего диаметра (второго порядка) составляют межфибрилярное пространство и пространство внутри микрофибрилл. Однако и те, и другие, хотя и с разным периодом действия проникшей воды, благоприятствуют набуханию древесных волокон в толщину на 20—30%, в длину — на 1—3% вследствие спиральной структуры волокна [19].

В древесине всегда содержится некоторое количество влаги. Обычно различают: влагосодержание свежесрубленной древесины — от 35 до 60%, иногда до 100% и более от массы абсолютно сухой древесины; влагосодержание воздушно-сухой древесины — обычно 15—20%, что зависит в основном от относительной влажности окружающего воздуха; влагосодержание мокрой древесины, которое может быть весьма высоким. Например, после длительного пребывания в воде влаги может содержаться до 150% и более от массы абсолютно сухой древесины. Абсолютно сухой древесиной условно считается древесина, высушенная до постоянной массы при температуре 105°C, хотя и в ней всегда содержится небольшое количество влаги.

Влага распределяется в древесине неравномерно: ее больше в комлевой части ствола, в заболонной части, меньше — в ядре, хотя иногда ядровая часть лиственных пород может оказаться влажнее заболони.

Влага бывает свободной, заполняющей внутренние полости клеток, т. е. капиллярное пространство первого порядка, и гигроскопической, находящейся в тончайших капиллярных пространствах второго порядка с возможным переходом в коллоидно-связанное состояние под влиянием взаимодействия ее с веществом дерева. Когда древесина длительное время находится в воздушной среде, насыщенной парами воды, т. е. при относительной влажности воздушной среды, равной 100%, тогда клеточные стенки полностью насыщаются гигроскопической влагой. Этот предел называется точкой насыщения волокон, или пределом гигроскопической влажности. Для древесины различных пород величина предела гигроскопичности колеблется от 23 до 35% массы сухой древесины. В среднем ее принимают равной 30%. К этому времени в волокнах свободной влаги пока еще нет, но набухание достигает своего максимума, причем линейное набухание составляет не выше 6—13%. При набухании наблюдается контракция (сжатие): объем

набухшей древесины меньше суммы объемов древесины до набухания и поглощенной воды. Явление контракции связано со сжатием воды, в частности ее первых порций (примерно до 6%), когда вода имеет повышенную плотность (до 2,6 г/см³), а объем поглощаемой воды сокращается примерно на 25%. Кроме контракции в процессе поглощения воды возникает также давление набухания (до 100—400 МПа) и выделяется теплота набухания (смачивания). Чем больше в целлюлозе кристаллической части и меньше аморфной, тем меньше набухают волокна и меньше теплота смачивания (набухания), а также сжатие воды.

Явление, обратное набуханию, называется усушкой. Оно выражено уменьшением линейных и объемных размеров древесины при удалении гигроскопической влаги.

Вследствие волокнистого строения древесина имеет разную усушку в различных направлениях. В радиальном направлении она составляет 3—6%, в тангенциальном — в полтора-два раза больше, чем в радиальном, и составляет 6—12%. Усушку вдоль волокон

ввиду ее незначительной величины не определяют. Объемную усушку $U_{об}$ вычисляют в процентах без учета продольной усушки по приближенной формуле

$$U_{об} = \frac{ab - a_0b_0}{ab} \cdot 100, \quad (7.1)$$

где a и b — размеры образца соответственно в тангенциальном и радиальном направлениях; a_0 и b_0 — размеры образца в тех же направлениях в абсолютно сухом состоянии.

Полный объем гигроскопической влаги в древесине (25—30%)

разделяют на адсорбционную, ориентированную водородными связями в наиболее тонких капиллярных пространствах (4—6% от абсолютно сухой древесины), и поглощенную вследствие капиллярной конденсации (20—25% от абсолютно сухой древесины). Остальная свободная влага находится в капиллярном пространстве первого порядка. При высушивании древесины особенно трудно удалить эти 4—6% влаги, так как она прочно связывается водородными связями.

Кроме влажности, гигроскопичности, влагопоглощения, влагоотдачи, характеризующих отношение древесины к водной среде, имеется еще целый ряд физических свойств, обуславливающих качество древесного материала. Для использования древесины в строительных целях наиболее значимыми из них являются: *истинная плотность* вещества древесины, которая примерно одинакова для разных пород и составляет 1,53—1,55 г/см³; *средняя плотность* колеблется в широком интервале для различных пород, для одной породы разного возраста или при разном соотношении поздней и ранней древесины. Кроме того, она зависит от влажности и пористости древесины. Как правило, средняя плотность древесины меньше 1 г/см³ (450—900 кг/м³), так как объем пор в ней значителен, например у сосны — 50—75, ели — 60—76, дуба — 32—64, липы — 65—75, а объем древесного вещества всего лишь 20—50%.

Так, например, средняя плотность древесины ели составляет 0,37—0,58, сосны 0,3—0,7, дуба 0,51—1,04, березы 0,5—0,75 г/см³. Но имеются породы и значительно легче, например, бальзовое дерево (0,1 г/см³) и значительно тяжелее — железное дерево, бакаут (1,35 г/см³) и др.

Среднюю плотность древесины с фактической влажностью пересчитывают на стандартную влажность, принимаемую равной 12%:

$$\rho_{012} = \rho_{ow} \cdot [1 + 0,01 \cdot (1 - k_0) \cdot (12 - W)], \quad (7.2)$$

где ρ_{012} — средняя плотность образца древесины при влажности $W = 12\%$; k_0 — коэффициент объемной усушки, который показывает, на сколько процентов изменяется объем образца при изменении его влажности на 1%. У древесины большинства пород $k_0 = 0,5$ (у березы, бука, лиственницы, граба $k_0 = 0,6$). Его определяют по формуле: $k_0 = V_o / (W_1 - W_2)$, где V_o — объемная усушка; W_1 и W_2 — влажность древесины соответственно начальная и конечная.

Древесина является плохим проводником теплоты, что обусловлено ее пористостью (поры заполнены воздухом). Теплопроводность вдоль волокон значительно больше, чем поперек. Так, например, у сосны вдоль волокон теплопроводность равна 0,35 Вт/(м·К), а поперек волокон — 0,17 Вт/(м·К). Она также выше в радиальном направлении, чем в тангенциальном.

Тепловое расширение древесины невелико, причем поперек волокон оно выше в 12—15 раз, чем вдоль (превышая тепловое расширение металлов).

Теплоемкость абсолютно сухой древесины разных пород примерно одинакова: 1,26—1,42 Дж/(г·К); по мере увлажнения теплоемкость древесины возрастает. Теплота сгорания абсолютно сухой древесины разных пород сравнительно мало различается и составляет 20160—21200 кДж/кг. Понятно, что с увлажнением теплота сгорания древесины сильно снижается.

Температурный коэффициент расширения древесины зависит от породы и направления волокон: вдоль волокон он равен 0,000002—0,00001, поперек волокон — 0,00003—0,00006.

Электропроводность сухой древесины очень мала, особенно при поперечном направлении волокон, поэтому она является хорошим изолятором. Но с увлажнением электропроводность возрастает, что служит основанием для измерения влажности по этому физическому свойству.

Абсолютно сухая древесина обладает удельным сопротивлением 10^{13} — 10^{15} Ом-м, ее относят к полярным диэлектрикам. По мере увлажнения удельное сопротивление древесины снижается, а при влажности выше предела насыщения клеточных стенок (30%) древесина может обладать ионной проводимостью. Это свойство учитывают, так как диэлектрический нагрев используют в производстве арболита, ДСП и ДВП, при модификации древесины.

Древесина, являясь важным строительным материалом, обладает высокой прочностью при действии сжимающих и растягивающих напряжений, которая находится в прямой зависимости от содержания поздней древесины, пористости и влажности, направления механических сил по отношению к расположению волокон, в чем особенно сильно проявляется ее анизотропия. Анизотропия является следствием медленно развивающейся оптимизации (упорядочения) микро- и макростроения в условиях роста дерева и максимального сопротивления ствола механическим нагрузкам, с выделением упрочняющих (армирующих) волокон в его тканях. Эти волокна ориентированы по направлениям действия главных напряжений. Вместе с тем они сочетаются с более податливыми волокнами ранней древесины. Можно утверждать, что существенное влияние на анизотропию древесины оказывает ее анатомическое строение (макроструктура), в первую очередь механические ткани. Предел прочности древесины хвойных пород при сжатии в 10, при растяжении в 20—30 раз больше для направления вдоль волокон, а модуль упругости почти в 40 раз больше поперек волокон. Различие "упругих свойств в разных направлениях связано с влиянием сердцевинных лучей, особенно у лиственных пород. Оно проявляется тем больше, чем больше доля сердцевинных лучей как своеобразных лучей жесткости в анатомическом строении древесины.

Ориентированное микро- и макростроение древесины обуславливает ее анизотропию не только при механических, но и при других физических воздействиях. Так, например, коэффициент теплового расширения меньше вдоль волокон и больше — поперек волокон (в тангенциальном направлении). Анизотропия набухания древесины выражена сильнее у хвойных пород, а отношение радиального давления набухания к тангенциальному составляет, по данным Я. Рачковского, для хвойных пород 0,6, а для лиственных — от 0,8 до 1. Вдоль волокон линейное набухание наименьшее (0,1—0,15%), а тангенциальное — наибольшее. Аналогичные анизотропные явления отмечаются, по данным Г.Г. Мудрова, в отношении усушки, теплопроводности, электропроводности и других свойств древесины (рис. 7.12).

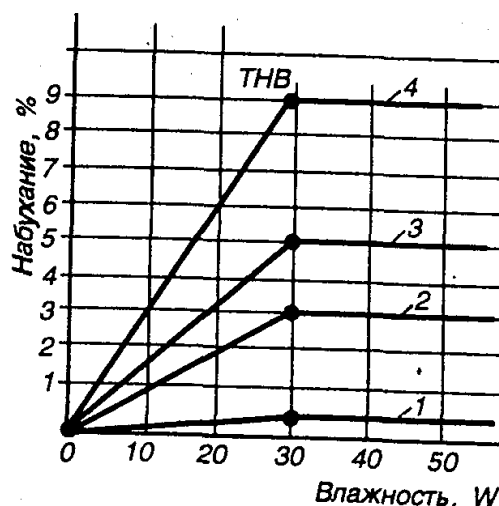


Рис. 7.12. Набухание древесины сосны: 1 — вдоль волокон; 2 — в радиальном направлении; 3 — в тангенциальном направлении; 4 — объемное (ТНВ — точка насыщения волокон)

Предел прочности древесины (с влажностью W в момент испытания) при сжатии вдоль волокон ($R_{сжW}$) определяют на стандартных образцах (прямоугольных призмах сечением 20х20 мм и длиной 30 мм) и рассчитывают по формуле

$$R_{сжW} = \frac{P_{\max}}{ab}, \quad (7.3)$$

где P_{\max} — максимальная разрушающая нагрузка, Н; a и b — размеры поперечного сечения, м.

Предел прочности при сжатии поперек волокон значительно меньше (10 — 30%) предела прочности при сжатии вдоль волокон.

Наибольшим является предел прочности при растяжении вдоль волокон; он в 2 — 3 раза выше, чем при сжатии вдоль волокон. Предел прочности при статическом изгибе $R_{изг}$ древесины (с влажностью W в момент испытания) определяют на образцах-балочках размерами 20х20 мм и длиной 300 мм при воздействии двух симметрично расположенных сил и вычисляют по формуле

$$R_{изг} = P_{\max} \cdot l / (bh^2), \quad (7.4)$$

где P_{\max} — разрушающая сила, Н; l — расстояние между опорами (пролет образца-балки), м; b и h — ширина и высота балки, м.

Прочность древесины при скалывании вдоль волокон невелика и составляет примерно 12 — 25% предела прочности при сжатии вдоль волокон.

Прочность древесины значительно понижается с увеличением влажности. Она должна быть приведена к прочности при стандартной влажности 12% по формуле

$$R_{12} = R_W [1 + \alpha(W - 12)], \quad (7.5)$$

где R_W — предел прочности при влажности $W, \%$; W — влажность испытуемой древесины, %; α — поправочный коэффициент на влажность, который показывает, насколько изменяется прочность древесины при изменении влажности на 1% (в пределах влажности от 0 до 30%).

Для сосны коэффициент α при сжатии и изгибе равен 0,04, т. е. материал теряет 4% прочности при увеличении влажности всего на 1%.

Корреляционная связь между прочностью и плотностью древесины, прочностью и процентом поздней древесины выражена в соответствующих эмпирических формулах:

$$\text{для сосны } R_{сж15} = 1035 \cdot \rho_{015} - 105; R_{сж15} = 6m + 300; \quad (7.6)$$

$$\text{для дуба } R_{сж15} = 850 \cdot \rho_{015} - 67; R_{сж15} = 3,2m + 295 \quad (7.7)$$

где $R_{сж15}$ — предел прочности при сжатии, кг/см^2 , при влажности 15% (после подсчета пересчитывают на стандартную влажность 12%); ρ_{015} — средняя плотность древесины при влажности 15%, г/см^3 ; m — процент поздней древесины.

Жесткость древесины, ее способность деформироваться под нагрузкой характеризуются модулем упругости: $E = R/\varepsilon$, где R — предел прочности древесины, ε — относительная деформация. Модули упругости при сжатии и растяжении вдоль волокон одинаковы и для сосны составляют 12300 МПа.

Деформативность в направлении вдоль волокон древесины сравнительно низкая. Невелика и твердость ее. Статическую твердость определяют по нагрузке, необходимой для вдавливания в образец древесины половинки металлического шарика радиусом 5,64 мм на глубину радиуса. Тогда площадь отпечатка равна 1 см^2 . Твердость древесины сосны, ели, липы, ольхи составляет 30 — 50 МПа, а более твердых пород — дуба, березы, ясеня, лиственницы и др. — 50 — 100 МПа. Важным технологическим свойством древесины служит способность удерживать гвозди, винты (особенно сосны, ели, ольхи). В лиственных породах (например, дубе) гвозди и винты удерживаются в 16 раз прочнее, чем в древесине хвойных пород. В некоторых породах при забивании гвоздя образуются трещины (бук, дуб, лиственница).

Основные физико-механические свойства древесины хвойных и лиственных пород, применяемых в строительстве, приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Основные физико-механические свойства некоторых пород древесины (среднее значение при влажности 12%)

Среднее значение при влажности 12 %						
Породы деревя	Средняя плотность , кг/м ³	Коэффи- циент объемно й усушки, %	Предел прочности, МПа, вдоль волокон при			
			растяжени и	сжати и	скалывании (радиальном)	статическо м изгибе
Хвойные породы						
Сосна обыкновенна я	500	0,44	103,5	48,5	7,5	86,0
Ель	445	0,43	103,0	44,5	6,9	79,5
Лиственница	660	0,52	125,0	64,5	9,9	111,5
Пихта сибирская	375	0,39	67,0	39,0	6,4	68,5
Лиственные породы						
Дуб	690	0,43	123,0	57,5	10,2	107,5
Береза	600	0,54	168,0	55,0	9,3	109,5
Бук	670	0,47	123,0	55,5	11,6	108,5
Липа	495	0,49	121,0	45,5	8,6	88,0
Ольха	520	0,43	101,0	44,0	8,1	80,5
Осина	495	0,41	125,5	42,5	6,3	78,0

В отличие от некоторых других строительных материалов сортность древесных пород устанавливают не по прочности испытуемых образцов, а на основании тщательного осмотра их и оценки имеющихся пороков древесины, нередко значительно снижающих фактическую прочность досок, брусев, бревен и другой лесопро-дукции. Поэтому целесообразно рассмотреть некоторые, наиболее распространенные, пороки древесины.

7.5. ПОРОКИ ДРЕВЕСИНЫ

Пороками древесины называют изъяны, возникающие на стадиях роста или хранения дерева, что непосредственно снижает качество и ограничивает использование лесоматериалов в строительных конструкциях. Их принято подразделять на ряд специфических групп: сучки, трещины, пороки формы ствола, пороки строения древесины, химические окраски, грибные поражения, повреждения насекомыми, инородные включения, деформации. Пороки растущего дерева обычно переходят в срубленную древесину. В ней возникают и собственные пороки — грибные поражения, химические окраски и др. Полная характеристика пороков и их влияния на качество древесины приведены в ГОСТ 2140—81.

Сучки — живые и отмершие, закрытые и заросшие, здоровые и загнившие представляют собой части (основания) ветвей, заключенные в древесине (рис. 7.13). Они нарушают однородность строения древесины, затрудняют механическую обработку пиломатериалов, нарушают закономерность распределения внутренних напряжений, уменьшают рабочее сечение пиломатериала и, следовательно, прочность древесины, ее сортность. Нередко прочность снижается на 50% и более, а в тонких досках и брусках — еще выше. Для несущих деревянных конструкций допускается применять древесину без сучков или со здоровыми сросшимися сучками, количество и размеры которых ограничены для каждого сорта материала. Сучки — основные сортоопределяющие факторы у древесины. Особенно вредны выпадающие, рыхлые и табачные несросшиеся сучки.

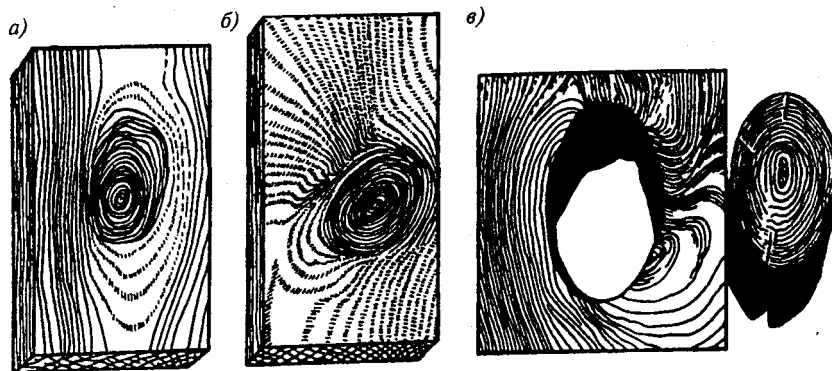


Рис. 7.13. Сучки различных видов: а — здоровый; б — роговой; в — выпадающий

Ненормальные окраски и гнили возникают под влиянием различных причин в период роста или хранения ствола и имеют различную степень вредности. Среди этой разновидности пороков наиболее выделяются: ложное ядро — встречается чаще всего у бука, березы и других заболонных и спелодревесных пород, иногда располагается эксцентрично. Оно отличается от настоящего ядра древесины по времени образования, форме и размерам. Ложное ядро не оказывает значительного негативного влияния, если отсутствуют признаки загнивания, но может нарушить общую фактуру изделия. Пятнистость (радиальная и тангенциальная) наблюдается на "торце в виде пятен шириной не больше годовичного слоя, вытянутых на радиальном срезе незначительно в виде узких полос, а на тангенциальном — в виде широких полос, вытянутых вдоль ствола, иногда на несколько метров. Этот порок ухудшает внешний вид пиломатериалов, не влияя на их механические свойства.

Ложное ядро и пятнистость характерны для растущего дерева. Однако изменение окраски нередко наблюдается и у срубленной древесины при ее хранении. В частности, к ним относятся химические и грибные окраски.

К химическим окраскам относятся желтизна, оранжевая окраска, продубина, чернильные пятна, дубильные потеки. Окраска проникает на глубину 1—5 мм, но мало влияет на физико-механические свойства древесины, ухудшая только внешний вид пиломатериалов.

Грибные окраски (гнили) поражают отмирающую и мертвую древесину. На отмирающей при медленном подсыхании образуется прелость вследствие поражения складскими грибами: плесень, цветной налет глубиной 1—2 мм, цветная заболонь, синева, коричневая или желтая окраска (в виде лимонно-желтых пятен и полос в отличие от химической окраски). Эти окраски развиваются за счет содержимого реагента.

Более опасными являются изменения окраски древесины, связанные с формированием гнили у растущего дерева и мертвой древесины.

Гнили у растущего дерева — пестрая, белая и бурая — образуются под воздействием грибов. Белая, пестрая (коррозийные) и бурая (деструктивная) гнили развиваются постепенно с появлением пятен и полос до появления мягкой гнили, имеющей трухляво-локнистую структуру и легко ломающейся пальцами. Гнилая древесина почти полностью теряет свои позитивные механические свойства, сильно понижается плотность; она непригодна к использованию в строительстве.

Гнили мертвой древесины являются одним из самых опасных пороков. Они могут развиваться после вторичного увлажнения в лежалой древесине и открытых деревянных сооружениях. Особенно распространена бурая деструктивная гниль, вызываемая грибами заборным, столбовым, шпальным и др. Древесина становится бурой, появляются поперечные и продольные трещины; древесина быстро приобретает трухлявость и распадается на куски.

В закрытых, плохо проветриваемых помещениях с высокой влажностью и умеренной температурой развивается бурая деструктивная гниль под воздействием так называемых домово-шахтных грибов, настоящего домового гриба (грибница ватообразная с каплями желтоватой жидкости), пленочного домового гриба (плодовое тело пленчатое распростертое), белого домового гриба (плодовые тела белые, мягкие, распростертые с большими угловатыми порами), шахтного или пластинчатого домового гриба (развивается в подземных сооружениях).

Эти разновидности грибов делают древесину непригодной для применения, опасной для окружающих древесных материалов.

Водослой — участок древесины, сильно пропитанный водой, расположенный на месте ядра, спелой древесины, ложного ядра или радиальной пятнистости. Как правило, водослой связан с очагами гнили.

Водослойная древесина отличается повышенными усушкой и разбуханием; после высыхания образуются трещины.

Грибные ядровые пятна и полосы — измененная окраска в зоне ядра, вызываемая грибами в растущем дереве, наблюдается на торцах и продольном разрезе. Этот порок называют также темнина или краснина. Ухудшая внешний вид пиломатериалов, на механические свойства почти не оказывает заметного влияния.

Значительное влияние на снижение механической прочности древесины оказывают пороки, именуемые **трещинами** и представляющие собой разрывы древесины вдоль волокон. Они характерны как для растущего дерева, так и для мертвой древесины, хотя их вид и размеры различные.

Трещины продольные — метиковые, простые и сложные. Эти трещины проходят через сердцевину ствола, находясь обычно в пределах зоны ядра или спелой древесины. Они идут по длине ствола от комля до зоны живых сучков, расширяясь от периферийной части ствола к сердцевине.

Простые метиковые трещины расположены по одному диаметру и идут по длине ствола в одной плоскости; сложные — по одному диаметру, но по спирали или по нескольким диаметрам (тогда по длине ствола идут по нескольким плоскостям) (рис. 7.14).

Отлупные трещины (неполные и кольцевые) — внутренние трещины, проходящие в зоне ядра или спелой древесины между годичными слоями. Отлуп как порок особенно часто встречается у дуба, осины, пихты, тополя, ели. Как и метиковые, отлупные трещины образуются при раскачивании дерева ветром и при резкой смене температуры.

Метки и отлуп, возникнув в растущем дереве, увеличиваются в своих размерах в срубленном дереве при его высыхании.

Морозные трещины — открытые радиальные трещины в растущем дереве, видимые на поверхности ствола (чаще в комлевой части дерева) и распространяющиеся до сердцевины. Возникают зимой при резком охлаждении стволов. Они поражают толстые стволы клена, бука, дуба, ясеня, а иногда осину и липу.

Пороки формы ствола. *Сбежистость* — значительное (выше нормы, равной 1 см на 1 м длины бревна) уменьшение диаметра ствола от комля к вершине, в пиломатериалах ведет к перерезанию волокон; сильно понижает пределы прочности при поперечном изгибе.

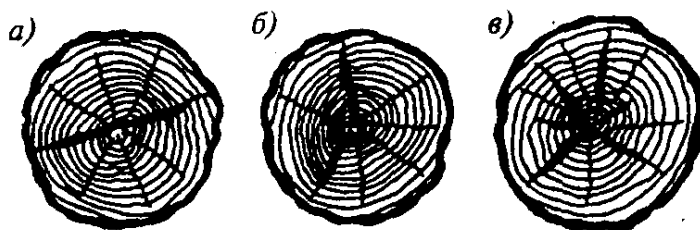


Рис. 7.14. Метиковые трещины в бревне; а — метик простой; б и в — метики сложные

Кривизна ствола — искривление по длине ствола; бывает простая кривизна — характеризуется одним изгибом по длине ствола и сложная — несколькими изгибами.

Закомелистость — резкое увеличение диаметра комлевой части (в 1—2 раза и более) по сравнению с диаметром сортамента, измеренным на расстоянии 1 м от комлевого торца (частый случай сбежистости). Этот порок также уменьшает выход пиломатериалов и шпона.

Пороки строения древесины. *Наклон волокон (косослой)* — волокна располагаются не параллельно оси ствола, а винтообразно, по спирали. Косослой оказывает отрицательное влияние на качество древесины, ее физико-механические свойства. Наклон волокон более 5% значительно снижает предел прочности древесины при растяжении вдоль волокон и поперечном изгибе. С изменением влажности древесина с наклоном волокон склонна к значительному короблению и скручиванию.

Крень бывает сплошная и местная. Характерна для комлевой части наклонных и искривленных стволов хвойных пород. Это резкое утолщение поздней зоны годовичных слоев при эксцентричном расположении сердцевины.

Плотность древесины сильно развитой крени на 15—40% выше нормальной (кремнина) мешает механической обработке древесины.

Свилеватость (волнистая и путаная) — неправильность в строении древесины, резковолнистое или беспорядочное расположение древесных волокон. Встречается преимущественно у лиственных пород в нижней комлевой части ствола (у осины, клена, ясеня, березы, тополя и др.). Свилеватость снижает прочность древесины при растяжении, изгибе, сжатии, но увеличивает прочность при скалывании. Свилеватую древесину используют в качестве отделочного строительного материала.

Повреждения насекомыми (червоточина). Червоточиной называют повреждения древесины в виде поверхностных бороздок, внутренних ходов (каналов) и отверстий, сделанных насекомыми, а чаще всего их личинками (жуками-короедами, жуками-усачами, долгоносиками, домовыми жуками-точильщиками, некоторыми разновидностями муравьев, бабочками (древоточцами и стеклянницами), термитами и др.).

Степень пораженности древесины этим пороком определяют количеством отверстий на 1 м лесоматериала, а в фанере — количеством отверстий на один лист.

Кроме того, следует отметить дефекты, которые возникают в основном при неправильных режимах обработки древесины.

Трещины усушки образуются в срубленной древесине и пиломатериалах при несоблюдении установленного режима сушки. Различают трещины торцовые, пластевые, кромочные, сквозные. Трещины усушки имеют меньшую толщину, чем метиковые и морозные, но также снижают прочность и сортность древесины.

Покоробленность относится к деформациям, возникающим при распиловке или сушке древесины; она затрудняет или даже полностью исключает использование пиломатериалов.

Механические повреждения при обработке древесины — отщеп, скол, вырыв и другие также затрудняют использование ее по назначению. Сюда же относятся раны, например, огневые, паразитарные — механические, сухостойкость, пожарная подсушина и др.

7.6. ЗАЩИТА ДРЕВЕСИНЫ ОТ ГНИЕНИЯ, ПОРАЖЕНИЯ НАСЕКОМЫМИ И ВОЗГОРАНИЯ

Долговечность и надежность строительных конструкций из древесины зависит от условий хранения и сушки, условий эксплуатации древесных материалов. Кроме того, для изменения некоторых свойств, придания древесине особых качеств ее подвергают обработке механическими, физическими и химическими методами. При этом изменяется макроструктура и молекулярная масса. Среди таких методов: прессование, модификация, радиационное облучение и т. д.

Сушка древесины. Сушка уменьшает возможность гниения древесины и повышает прочность. Различают естественную сушку и искусственную.

Естественная сушка производится на открытом воздухе, под навесами (для защиты от дождя и солнечных лучей) или в закрытых помещениях с тем, чтобы материал принял воздушно-сухое состояние (15—20% влажности). Такая сушка длится недели и даже месяцы; она не исключает поражения древесины грибами. Ее достоинством является отсутствие расхода тепловой энергии (топлива).

Искусственная сушка осуществляется в короткие сроки, например, в течение нескольких дней или часов. Она полностью исключает возможность заражения грибами и обеспечивает высокое качество древесины. Имеется несколько разновидностей искусственной сушки, осуществляемых практически в любое время года.

Камерная сушка производится в сушилках периодического и непрерывного действия в течение нескольких суток. Теплоносителем служат нагретый воздух, пар или дымовые газы температурой 70—80°C. Также производится сушка древесины в *электрическом поле высокой частоты*. Древесина быстро и равномерно прогревается между электродами и высушивается в 10—20 раз быстрее, чем при камерной сушке. Нагрев в высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных полях относится к наиболее совершенным способам сушки древесины и древесных материалов. Основным достоинством использования СВЧ нагрева — автоматическое выравнивание влажности, так как в местах с большей влажностью выделяется больше теплоты, чем в местах с меньшей. В производстве древесностружечных и древесноволокнистых плит выравнивание влажности стружки или древесной шерсти позволяет сократить время обработки, потери сырья; уменьшить расход связующего и улучшить качество плит.

Более дешевый способ — *сушка в жидких средах*, в частности в ваннах с петролатумом (отходом при депарафинизации нефтяных масел) при температуре 130—140°C. За несколько часов влага в древесине вскипает, превращается в пар с давлением выше атмосферного и удаляется; при этом материал не растрескивается и не коробится. Сушка в петролатуме не дороже камерной сушки, продолжительность ее 8—12 ч.

Защита древесины от загнивания и поражения насекомыми. Существует ряд конструктивных мер для предотвращения загнивания древесины — изоляция ее от грунта, каменной кладки, бетона; проветривание деревянных конструкций; защита от атмосферных осадков лакокрасочными покрытиями или гидроизоляционными материалами. Но эти меры не всегда могут полностью предохранить древесину от увлажнения и возникает необходимость в антисептировании деревянных материалов и изделий.

Антисептики — это химические вещества, которые убивают грибы, вызывающие гниль, или создают среду, в которой их жизнедеятельность прекращается. Антисептики должны обладать токсичностью только по отношению к грибам и быть безвредными для людей и животных, не ухудшать качества древесины, по возможности не вызывать коррозию металлических креплений.

Антисептики подразделяют на водорастворимые, применяемые только в сухих условиях, главным образом внутри помещений, и нерастворимые в воде, маслянистые, применяемые для антисептирования шпал, столбов, свай; применяют также иногда препараты, рас-

творимые в зеленом масле, мазуте, керосине и сольвент-нафте. Среди этих препаратов — типа ПЛ (раствор пентахлорфенола) и типа НМЛ (растворы нафтенита меди). Они высоко токсичны.

К *водорастворимым антисептикам* относится фтористый натрий NaF — порошок без запаха, белого цвета, применяемый в растворах 3—4%-ной концентрации. При соприкосновении с известковыми, цементными и гипсовыми материалами фтористый натрий теряет свои токсические свойства. Кремнефтористый натрий Na_2SiF_6 — белый или серый порошок, применяется совместно с фтористым натрием или кальцинированной содой, а также в силикатных пастах. Кремнефтористый аммоний $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ — белый порошок более высокой токсичности, чем фтористый натрий; повышает огнестойкость древесины, но вызывает слабую коррозию металла. Препарат ББК-3 — смесь борной кислоты и буры, хорошо растворяется в воде, для людей практически безвреден. Препараты ХХЦ (смесь хлористого цинка и хромпика) и МХХЦ (смесь хлористого цинка, хромпика и медного купороса) трудно вымываются водой, но окрашивают древесину в желто-зеленый цвет и вызывают коррозию металлов. Препарат ГР-48 — антисептик на основе пентахлорфенола, применяют в растворе 1—1,5%-ной концентрации для поверхностной защиты пиломатериалов, например от синевы и плесени.

К *маслянистым антисептикам* относятся антраценовое, креозотовое и сланцевое масла. Это темно-коричневые жидкости с резким запахом и сильными токсическими свойствами. Они не растворяются в воде, не вызывают коррозию металла, но окрашивают древесину в бурый цвет. Применяются для пропитки шпал, деталей мостов, свай, деревянных подводных конструкций и др. Нельзя применять в жилых помещениях — они огнеопасны и имеют резкий запах.

Применяют также *антисептические пасты*, приготовляемые из фтористого натрия, связующего вещества (битума, глины, жидкого стекла и др.) и наполнителя (например, торфяного порошка); пастами защищают элементы древесины с повышенной влажностью (выше 40%), а также концы балок в каменных стенах, столбы и др. Элементы открытых сооружений, обработанных пастой, защищают гидроизоляционным покрытием.

Пропитку антисептиками производят поверхностной обработкой, в горяче-холодных ваннах и под давлением в автоклавах.

Поверхностную обработку делают кистями или краскопультом в 2—3 приема, иногда погружают изделия в ванну с антисептиком.

Более глубокая пропитка получается при последовательном погружении изделия сначала в горячую ($t = 90—95^\circ\text{C}$), а затем в холодную ($t = 20—30^\circ\text{C}$) ванну с антисептиком: в горячем антисептике из пор древесины уходит излишек воздуха, а при погружении в холодную ванну в порах образуется вакуум и антисептик пропитывает древесину на большую глубину.

Наиболее глубокая пропитка антисептиком получается в специальных автоклавах под давлением: сначала в автоклаве создается вакуум, из пор древесины удаляется воздух, а затем автоклав наполняют горячим антисептиком с давлением до 0,6—1,5 МПа. Получается почти сплошная пропитка древесины.

Для борьбы с дереворазрушающими насекомыми используют главным образом химические средства, ядовитые вещества, убивающие насекомых и их личинки. Древесину обрабатывают опрыскиванием газами. Можно использовать маслянистые и органикорастворимые антисептики, а также специальные инсектициды — хлорофос (диметилтрихлорксилфосфонат), порошок и пасту ДДТ, дуст, а также некоторые газы (хлорпикрин).

Защита древесины от возгорания. Древесина относится к легко возгораемым материалам. Ее возгорание происходит при температуре $260—290^\circ\text{C}$, а при нагревании выше 350°C она может воспламениться из-за выделяющихся газов, поэтому деревянные конструкции удаляют от источников нагревания; деревянные элементы покрывают штукатуркой или облицовывают несгораемыми материалами (например,

асбестоцементными); окрашивают огнезащитными красками или пропитывают специальными веществами — антипиренами.

Огнезащитное действие антипиренов основано на том, что при нагревании древесины одни из них образуют оплавленную пленку на поверхности древесины, а другие — выделяют негорючие газы, оттесняющие воздух и выделяемые деревом при нагревании горючие газы от поверхности древесины. В качестве антипиренов применяют буру, хлористый аммоний, фосфорнокислый натрий и аммоний, сернокислый аммоний. Обработка антипиренами производится теми же способами, что и антисептирование.

7.7. МОДИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Прессование древесины. Под действием внешнего давления, величина которого превышает предел прочности при сжатии, уменьшается объем пор и увеличивается плотность древесины. Прессование проводят, в основном, в направлении, перпендикулярном направлению волокон с нарушением структуры клеток и сосудов. Особенно сильное изменение испытывают элементы (трахеиды, сосуды) ранней части годовичных слоев. Полного сближения стенок трахеид хвойных пород не возникает даже при очень высоких степенях прессования. Абсолютно плотная сухая древесина имеет плотность $1,4 \text{ г/см}^3$, тогда как плотность древесинного вещества составляет $1,53 \text{ г/см}^3$. Отмечено, что с увеличением степени прессования абсолютно сухой древесины ее диэлектрические параметры (диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь) растут во всем диапазоне частот от 20 до 10^{10} Гц. Это указывает, в частности, на возрастание изотропии древесины, что повышает качество древесных материалов.

Модифицирование древесины производят с целью изменения ее физико-механических свойств. Так, например, пропитка синтетическими смолами снижает разбухание древесины в 2—4 раза, увеличивает прочность в 2—5, твердость до 78 раз, стабилизирует электрические свойства, увеличивает срок службы. Наиболее известна конвективная обработка древесины синтетическими смолами. Для интенсификации и повышения качества древесного модифицированного материала нередко используют электромагнитные поля высоких и сверхвысоких частот. В результате реакции полимеризации протекают не в течение нескольких часов, а только нескольких минут. В качестве синтетических веществ при модификации древесины используют кремнийорганические соединения (марок КРЖ № 5, КО-815 и др.), полиэфирные смолы (ПН-1), фенолформальдегидные смолы) и др.

Облучение древесины производится различными дозами гамма-излучения. Происходит деструкция компонентов в цепи макромолекул. При дозах в 3 Мрад слабо изменяется степень кристалличности целлюлозы. Уровень облучения в 30 Мрад приводит уже к заметному уменьшению кристалличности целлюлозы. При дозе выше 100 Мрад быстро снижается степень кристалличности, что связывают с уменьшением количества СН—ОН групп. В результате облучения возрастают однородность и плотность аморфного состояния древесины.

7.8. ДРЕВЕСНЫЕ ПОРОДЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В строительстве и смежных областях используют обе разновидности древесных пород — хвойные и лиственные, но для инженерных конструкций более широкое использование находят хвойные, обладающие большей длиной и прямолинейностью ствола, повышенной стойкостью против загнивания, большей территориальной распространенностью. По значимости и объемам применения их можно расположить в следующем порядке: сосна, ель, лиственница, пихта, кедр и тис.

Сосна — порода ядровая, ядро обычно имеет буро-красный цвет, заболонь желто-белого цвета. Различают рудовую сосну, которая растет на глубоких рыхлых супесчаниках и легких суглинистых почвах, на возвышенных местах, имеет мелкослойную плотную древесину, узкую заболонь, смолиста. Другая разновидность сосны — мяндовая — растет на низменных глинистых почвах, имеет рыхлую весеннюю древесину, широкослойную, менее смолистую, чем рудовая сосна, и уступает последней по качеству. Сосна имеет невысокую среднюю плотность и сравнительно высокую прочность (см. табл. 7.1). Ее применяют в виде кругляка (столбы, сваи и др.) и пиленых лесоматериалов, а также для изготовления столярных изделий, производства фанеры и некоторых строительных деталей (окна, двери, коробки и др.).

Ель — порода спелодревесная, имеет незначительное количество смоляных ходов, менее стойкая против загнивания, чем сосна. Цвет древесины белый, со слабым желтоватым оттенком. В досках и брусках ель можно узнать по круглой форме сучков в отличие от овальной формы сучков на плоскости распила сосны. Ее средняя плотность несколько ниже, чем у сосны (см. табл. 7.1). Употребляется в промышленном и жилищном строительстве, является основным сырьем в целлюлозно-бумажном производстве. Наличие большого количества твердых сучков затрудняет ее применение в столярном производстве.

Лиственница. — порода ядровая. Ядро красновато-бурого цвета, заболонь светлая, узкая. Ее древесина имеет мелкие немногочисленные смоляные ходы, обладает высокой плотностью, стойкостью против загнивания, твердостью, прочностью (см. табл. 7.1), но склонна к растрескиванию. Используют в гидротехническом и подземном строительстве, в кораблестроении как надежный и долговечный строительный материал. Произрастает лиственница, в основном, в Сибири, а также на Дальнем Востоке.

Пихта — порода спелодревесная, ядра в пихте нет. Цвет древесины белый со слабым желтоватым оттенком. Древесина пихты похожа на древесину ели, но не имеет смоляных ходов, менее стойкая к загниванию и менее прочная (см. табл. 7.1). Произрастает в Сибири и на Кавказе, используется в строительстве наравне с елью, является ценным материалом в производстве музыкальных инструментов.

Кедр — порода ядровая, по свойствам приближается к сосне. Ядро светло-бурого цвета, заболонь широкая, желтовато-бурая и по цвету мало отличается от ядра. Древесина кедровая легкая, механические свойства ниже, чем у сосны. Применяют в качестве строевого леса и в основном для производства столярных изделий, так как легко обрабатывается. Произрастает кедр, главным образом, в Сибири.

Тис — порода ядровая, древесина красноватая, плотная. Относится к роду вечнозеленых хвойных деревьев семейства тисовых. Декоративная, произрастает в нескольких реликтовых видах. Древесина тиса ценится в мебельном производстве.

К группе лиственных относятся две их основные разновидности, различающиеся по своей микроструктуре: кольцесосудистые, у которых крупные водопроводящие сосуды на поперечном разрезе древесины собраны кольцом в весенней части годичного слоя, и рассеяннососудистые, у которых сосуды мелкие, беспорядочно расположены на поперечном разрезе или совсем не видны.

Из кольцесосудистых пород наибольшее применение в строительстве нашли дуб, ясень и вяз.

Дуб — порода ядровая, обладает высокой плотностью, механической прочностью, стойкостью против гниения и вязкостью (см. табл. 7.1). Ядро имеет темно-бурую окраску, отличную от желтоватого цвета заболони. В древесине хорошо просматриваются крупные сердцевинные лучи; обладает красивой текстурой и цветом в тангенциальном и поперечном срезах. Используют дуб в ответственных конструкциях гидротехнических сооружений, при возведении мостов, а также для изготовления паркета, мебели, облицовочной фанеры, высококачественных столярных изделий. При долгом (десятки и сотни лет) вылеживании в воде дуб темнеет до черного или темно-серого цвета, становится мореным дубом — весьма ценным декоративным и отделочным материалом. Кору используют для получения дубящих веществ.

Ясень — порода ядровая, по текстуре напоминает дуб, но с узкими сердцевинными лучами, видимыми в срезах под микроскопом. Имеет древесину высокой прочности, упругости, но в сырых местах и в местах с переменным влажностным режимом быстро загнивает. Применяют для выполнения столярно-отделочных работ, изготовления мебели.

Вяз — порода ядровая, имеет плотную, вязкую, твердую и прочную древесину, подобно дубу хорошо поддается загибу, однако по физико-механическим свойствам уступает дубу. Применяют для производства фанеры, мебели и др.

Из рассеяннососудистых наиболее широко используют для строительных целей как мягкие разновидности пород — береза, осина, ольха, липа, так и твердые — бук, граб, клен.

Береза — порода забеленная. Древесина прочная, твердая, вязкая, но относительно легко загнивает в сырых и мало проветриваемых помещениях, легко обрабатывается. Ее применяют для изготовления строительных изделий и деталей, мебели, паркета, отделочных материалов.

Осина — порода спелодревесная. Древесина по прочности уступает березе, мягкая, легкая, малостойкая против загнивания, но в сухом месте сохраняется хорошо, при высыхании не коробится. Осину используют в фанерном производстве, для возведения временных построек, изготовления тары, а также в целлюлозно-бумажной промышленности.

Ольха — порода заболонная, древесина легкая, мягкая, малостойкая против загнивания, по цвету — светло-коричневая с розовым оттенком в сухом ее состоянии. Применяется наравне с березой.

Липа — порода заболонная, древесина легкая, нестойкая к гниению, имеет ограниченное применение в качестве строительного материала для временных построек и неотчетственных сооружений. Используется при изготовлении мебели, фанеры, тары.

Бук — порода спелодревесная. Древесина плотная, прочная, по свойствам бук близок к дубу, но в отличие от него — малостоек против гниения. Применяют для изготовления паркета, фанеры, шпал, а также мебели.

Граб — порода заболонная, род семейства березовых, произрастает в Крыму и на Дальнем Востоке. Древесина тяжелая, твердая, обладает повышенными показателями механических свойств, при высыхании — значительно растрескивается и коробится. Применяют для тех же целей, что и бук, а также при производстве музыкальных инструментов, в машиностроении и др.

Клен — порода спелодревесная, мягкая, род деревьев семейства кленовых. Древесина плотная, тяжелая, прочная. Используют в строительстве как отделочный материал, для производства фанеры, мебели, музыкальных инструментов.

7.9. МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

Продукцию, получаемую из древесины, разделяют на несколько групп: лесоматериалы после механической обработки дерева; древесные материалы; модифицированная древесина.

Лесоматериалы подразделяются на круглые, пиленные, лущеные, фрезерованные (строганные), колотые и побочные продукты — опилки, стружка, щепа, древесная мука.

Круглые лесоматериалы, т. е. стволы поваленного дерева, очищенные от сучьев. Их делят на части (процесс называется раскряжкой) разной длины — бревна, кряжи, чураки. По толщине круглые лесоматериалы подразделяют на крупные диаметром более 26 см, средние — от 14 до 24 см, мелкие — от 6 до 13 см. Еще более тонкий лес, диаметром от 3 до 7 см, называют жердями. В зависимости от качества древесины (наличия пороков и дефектов обработки) круглые лесоматериалы делят на четыре сорта, из которых в строительстве используют главным образом 2-й и 3-й.

Пиломатериалы подразделяют на бруски, брусья, пластины, четвертины, доски и горбыль (рис. 7.15). Бруски имеют толщину менее 100 мм и ширину не более двойной толщины, брусья — толщину и ширину более 100 мм; доски — толщину менее 100 мм и ширину более двойной толщины. Брусья и доски бывают обрезные и необрезные (кромки не пропилены или пропилены меньше, чем на половине длины). Доски тоньше 32 мм называют тонкими, или тесом. Длина досок от 1 до 6,5 м.

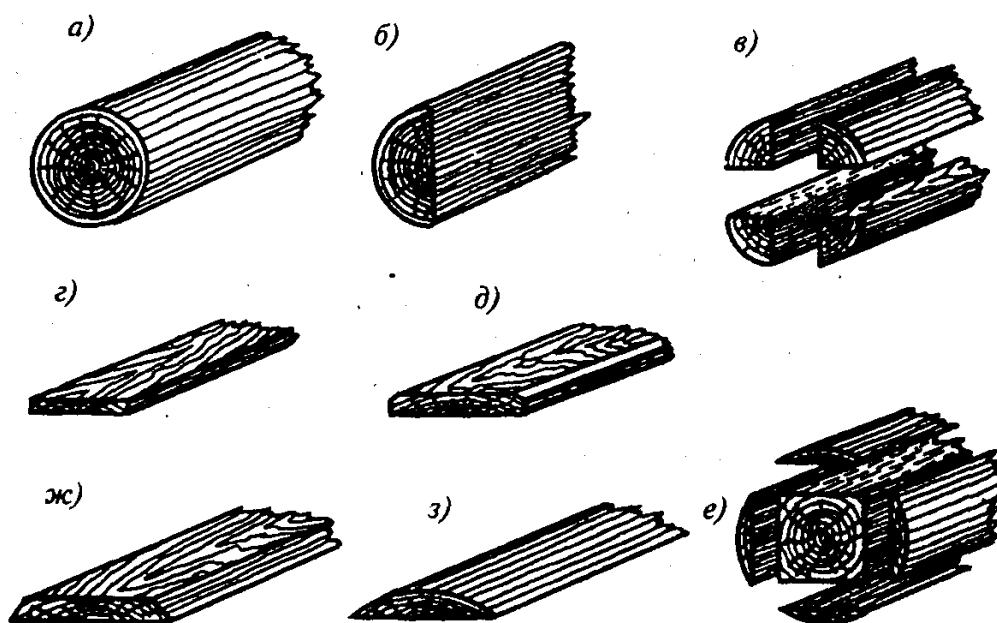


Рис. 7.15. Виды пиломатериалов:

а — пиловочные строительные бревна; б — пластины; в — четвертины; г, д — обрезные доски; е — брус; ж — необрезная доска; з — горбыль

Доски и брусья хвойных пород делят на пять сортов — отборный, 1, 2, 3 и 4-й. В столярном производстве используют только 1-й и 2-й сорта. Максимальная ширина досок и брусьев 250 мм, брусков — 200 мм. Пиломатериалы лиственных пород делят на три сорта.

Для производства деталей готовых изделий применяют так называемые заготовки — доски и брусья, прирезанные применительно к заданным размерам и с припуском на механическую обработку и усушку. Их используют для изготовления клееных конструкций, а также плинтусов, галтелей, карнизов, наличников и др.

Изделия из древесины. Элементы небольшого поперечного сечения — деревянные фрезерованные детали, называемые погонажными (их измеряют погонными метрами):

плинтусы, галтели, карнизы, пояски, наличники, поручни для лестничных перил, обшивки, раскладки, а также доски и бруски для покрытия полов (на одной кромке имеют паз, на другой — гребень).

Столярные плиты состоят из внутреннего щита, который изготавливают из узких реек путем их тесного состыковывания впритык, и наклеенных на него с обеих сторон шпона в один или два слоя. Для производства столярных плит используют древесину хвойных и лиственных мягких пород, главным образом отходы производства (горбыли, рейки и др.). Размеры столярных плит: длина — до 2500 мм, ширина — до 1525 мм, толщина — до 30 мм. Из этих плит изготавливают двери, перегородки, щитовую мебель и пр.

К *паркетным изделиям* относят штучный паркет, паркетные доски, паркетные щиты и мозаичный (наборный) паркет. Штучный паркет состоит из планок твердых пород древесины (дуба, ясеня, бука, клена и др.) определенных размеров и формы. Паркетные доски представляют собой очень экономичные промышленные изделия, поскольку на них расходуется мало ценной древесины. Планки имеют длину 140—170 мм, ширину 20—30 мм и толщину 6—8 мм. Их наклеивают водостойкими клеями на реечное основание длиной 1,2—3,0 м, шириной 150—175 мм.

Паркетные щиты состоят из деревянного основания из брусков и лицевого покрытия из паркетных планок. Щиты размерами 400х400 или 800х800 мм соединяют между собой в паз и гребень или на вкладные шпонки.

Наборный (мозаичный) паркет состоит из отдельных планок твердых пород древесины, наклеенных лицевой поверхностью на бумагу водорастворимым клеем, который смывается после укладки паркета на основание.

К изделиям из древесины относится также *фанера*, применяемая в качестве отделочного и конструктивного материала в деревянных конструкциях. Фанера состоит из отдельных тонких слоев древесины — шпона, полученных лущением на специальных лущильных станках или строганием распаренных древесных кряжей и склеенных между собой. Слои шпона располагают так, чтобы направление волокон в соседних слоях было взаимно перпендикулярно. Чаще всего фанера имеет нечетное число слоев — 3, 5, 7 и т. д., толщину от 1,5 до 18 мм и размеры листа до 2400х1525 мм. Фанера бывает обычная клееная и декоративная, облицованная пленочным покрытием из смол или декоративной бумагой. Применяют также бакелизованную фанеру из листов березового шпона, склеенных феноло- или крезолоформальдегидными смолами, которая отличается повышенной прочностью и водостойкостью.

Столярно-строительные изделия — оконные и дверные блоки, перегородки и панели жилых и гражданских зданий — относятся к крупноразмерным изделиям. Изготавливают целые комплекты для сборных деревянных домов — брусковых, каркасно-обшивных и каркасно-щитовых. Их производство осуществляется на специализированных деревообрабатывающих заводах; там же изготавливают балки для перекрытий, щиты для наката и перегородок, арки и части металлодеревянных ферм, сваи, шпунт, мостовые брусья и шпалы.

В последние годы все шире применяют клееные конструкции, крупноразмерные элементы, изготавливаемые путем склеивания сравнительно небольших деревянных заготовок друг с другом или с другими материалами, — арки, балки двутаврового сечения, блоки и т. п. Они отличаются большей прочностью, водостойкостью, био- и огнестойкостью, чем обычные конструкции из древесины, не подвержены усушке и короблению. Использование клееных конструкций — один из наиболее экономически эффективных путей применения древесины в строительстве.

7.10. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

Чтобы получить достаточно полное представление об использовании древесины в строительстве, рассмотрим строительные материалы, получаемые из древесных отходов. Строго говоря, эта группа материалов в большей мере относится к искусственным материалам (ИСК), так как при их получении происходит частичное или полное изменение химического состава древесины под влиянием химической технологии. Вместе с тем эти материалы можно рассматривать как пример отсутствия четкой границы между природными и искусственными материалами, применяемыми в строительстве. Такие примеры с не вполне четкой границей раздела между этими типами материалов встречаются и при рассмотрении каменных и других материалов.

В нашей стране ежегодно заготавливается огромный объем (свыше 400 млн. м³) древесины, которая направляется главным образом на нужды строительства. Однако чем больше вырабатывается деловой древесины, тем большие отходы получают при лесозаготовках и переработке стволовой древесины. Сейчас древесные отходы доходят до 140—150 млн. м³ в год, большая часть которых вывозится на свалку или сжигается. До последнего времени в строительной промышленности с пользой использовалось до 25% древесины, получаемой с лесосеки. В настоящее время объем использования ее нередко возрастает до 75—80%. Технический прогресс коснулся главным образом механизированного производства столярных и древесноволокнистых плит, деревобетона (арболита), древесностружечных плит, щитов и др. Эти изделия анизотропны по свойствам, не коробятся, не усыхают и как полуфабрикат используются при производстве красивых фанерованных дверей, встроенной мебели, облицовочных панелей, перегородок, теплоизоляционных изделий и деталей, стеновых блоков и панелей (из арболита), паркета, кровли и т. д.

Из кусковых отходов лесопиления и деревообработки изготавливают клееные панели, щиты и плиты, щитовой паркет, дверные коробки, кровельную и штукатурную дрань, кровельную плитку и гонт¹; заготовки для столярного производства, арболит и стеновые блоки и панели из него, древесноволокнистые и древесностружечные плиты и др. Они с успехом заменяют деловую древесину. Очень широко в строительстве используют древесноволокнистые плиты, 1 м³ которых заменяет 2,5 м³ строганых пиломатериалов. Плиты используют для отделки стен, перегородок, дверных проемов, встроенной мебели, кухонной мебели и других элементов в жилых, общественных и промышленных зданиях. Большим спросом у строителей пользуются также плиты древесностружечные плоского прессования, применяемые в качестве конструкционного и отделочного материала. Особенно часто изделия из древесных отходов используют как теплоизоляционный материал. Значительное количество древесных кусковых отходов, щепы и стружки, в особенности хвойных пород, может быть использовано при производстве кровельного картона.

Из опилок и стружек материалы и изделия изготавливают либо на основе вяжущих веществ (опилкобетон, ксилолит, термиз, термoporит, гипсоопилочные блоки и др.), либо без применения специальных вяжущих (лигноуглеводные пластики, вибролит и др.).

При изготовлении опилочных конгломератов на основе вяжущих веществ в смесь вводят песок, гравий, минерализаторы (жидкое стекло, известковое молоко, раствор фтористого натрия и др.). В качестве вяжущих веществ используют цемент, известь, гипс, каустический магнезит и др. Так, например, для приготовления ксилолитовой смеси при производстве плит (для устройства полов) используют каустический магнезит, затворяемый на водном растворе хлористого магния. В полутонном или двойном количестве (по объему) по отношению к магнезиту добавляют в смесь опилки влажностью не более 8%, а при необходимости получения жесткого покрытия (а не пластичного) вносится еще небольшая часть кварцевого песка. В так называемые твердые опилочные

¹ Гонт, или драница, — узкие и тонкие дощечки для покрытия крыши.

плиты в качестве связующего вносятся смолы или смесь смолы с аммиаком, а при производстве листового тырсолита толщиной от 1,5 до 8 мм используют карбамидную смолу с примесью отвердителя (контакта Петрова).

При изготовлении опилочных конгломератов без введения в их состав каких-либо специальных вяжущих веществ учитывают способность древесины к выделению собственных клеящих веществ в процессе гидролитического расщепления лигноуглеводных комплексов клеточных оболочек и полисахаридов. Технологический регламент характеризуется сушкой и дозированием древесных частиц, формованием и подпрессовкой на поддоне ковра необходимой толщины, горячим прессованием и охлаждением под давлением пресса. Именно по такой схеме изготавливают лигноуглеводные древесные пластики. На прочность такого пластика оказывает влияние размер древесных частиц: с их измельчением возрастает прочность пластика. Наиболее ответственный режим на стадии горячего прессования ведется при давлении 1—5 МПа и температуре 160—170°C с последующим охлаждением плит пресса до 20°C. Имеет значение порода исходной древесной смеси. Для этих пластиков пригодны ель, лиственница, сосна, береза и осина. Готовые изделия (пластики) используют в качестве конструктивно-отделочного материала; в технологический период их покрывают облицовочным шпоном. Сходными в производстве являются пьезотермопластики — плитный или плиточный материал, изготавливаемый при высоких давлениях и температуре из древесных отходов, особенно опилок, без добавления связующих веществ. Существуют две технологические схемы их производства: без предварительной обработки древесных отходов и с обработкой отходов (гидролизом) древесных опилок — горячей водой (или паром), иногда с химикатами. По второму способу получают пластик повышенного качества, например предел прочности при статическом изгибе до 25—40 МПа, при растяжении — до 20—25 МПа, при сжатии — до 60—80 МПа, теплопроводность — 0,24 Вт/(м·К) и т.п. Пьезотермопластики используют для покрытия полов взамен паркета и изготовления дверей, в качестве отделочного материала и т. д. Из опилок и мелкой стружки после обработки в молотковой дробилке и вибромельнице, формования и горячего прессования получают вибролит. Плиты из вибролита обладают достаточно высокими показателями качества: плотность 400—800 кг/м³, предел прочности при статическом изгибе 3—13 МПа, теплопроводность 0,08—0,09 Вт/(м·К) и т. п. Вибролит используют для настила черного пола, устройства перегородок, щитовых дверей, изготовления встроенной мебели и пр.

Из коры и сучьев получают материалы и изделия на основе вяжущих или без них. Так, например, с применением гипсового вяжущего получают королит. Для этого подсушенную, измельченную и просеянную кору загружают в смеситель, заливают растворами антисептика (например, оксифениланатрия) и ингибитора (например, казеина, буры, мездрового клея). Смесь соединяют с гипсовым вяжущим веществом, перемешивают до однородного состояния и уплотняют в формах при давлении 0,03—0,04 МПа. Вместо гипсового вяжущего можно использовать также портландцемент и цементно-песчаный раствор. Королит применяют как утеплитель полов и стен.

Среди других изделий, изготовленных из коры и сучьев с добавлением или без добавления связующих, следует отметить изоляционные плиты, плиты из цельной коры, сучкоблоки и др. При изготовлении изоляционных плит пресс-массу из измельченной коры ели, гидрофобизатора и антипирена обрабатывают связующим в виде сульфитной барды (отход производства целлюлозы по сульфитному способу), формуют и подвергают горячему прессованию. В плитах из цельной коры ели, пихты или лиственницы отсутствует какое-либо дополнительно введенное вяжущее или клеящее вещество. Для их получения снимают кору специальным образом со ствола, обрабатывают и склеивают ее в листы путем прессования. Эти плиты имеют длину до 3 м, ширину 0,4—1,2 м и толщину до 25 мм. Используют их для обшивки стен, перегородок, устройства кровли (иногда с покрытием известковым раствором). При изготовлении сучкоблоков используют отходы

от лесозаготовок — свежесрубленные ветви сосны, ели, ивы, пихты, кедра и др. Спрессованный готовый блок из ветвей стягивают в двух местах проволокой диаметром 3 мм, а неровности в виде боковых сучков удаляют циркулярной пилой. Блоки антисептируют, подвергают атмосферной сушке до влажности 20—30%, используют в бескаркасном одноэтажном строительстве, а также для изоляции. При увеличении высоты зданий их применяют в сочетании с металлической арматурой диаметром 4—8 мм, укладываемой на уровне перемычки, подоконников и др. Размеры сучкоблоков: конструктивных — 500х450х350 мм, изоляционных — 500х450х250 мм.

Кроме рассмотренных выше материалов и изделий из древесных отходов имеется большое количество освоенных промышленностью и широко применяемых традиционных органических теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных материалов — камышитовые плиты, торфяные плиты и др.

Материалы и изделия с применением отходов древесины, часть которых была указана выше, являются, как правило, типичными представителями строительных конгломератов, получаемых на искусственных или естественных (лигнин, полисахариды) связующих веществах. Несомненно, что при оптимальных структурах они обладают комплексом наилучших показателей свойств, поэтому их состав следует определять с учетом ранее изложенных общих закономерностей (см. гл. 5). Вместе с тем на их примере очевидна некоторая условность границы при разделении строительных материалов на искусственные и естественные, тем более с конгломератным типом структуры.

Глава 8

Природные каменные материалы и изделия¹

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Природные строительные материалы, получаемые в результате относительно несложной механической обработки монолитных горных пород с сохранением их физико-механических и технологических свойств, используют в виде плит, блоков, бортовых и облицовочных камней, дорожной брусчатки, бутового камня, щебня, дробленого песка и т. д. В огромных количествах используют также естественные рыхлые породы: валуны, гравий, песок, глину и др. Кроме того, горные породы являются важнейшими сырьевыми продуктами при получении искусственных строительных материалов (строительной керамики, огнеупоров, стекла, цемента, извести и др.), для чего их подвергают сложным видам механической и химической переработки.

Широкое использование природного сырья связано с благоприятными физико-химическими свойствами многочисленных пород. Уже в ранний период своего существования человек обнаружил на поверхности земли и в ее недрах множество природных материалов, которые полностью удовлетворяли его сравнительно ограниченные потребности. На последующих стадиях развития человеческого общества появляются повышенные требования к качеству строительного камня и одновременно усложняются способы обработки и переработки природного сырья для получения материалов с иными качествами и свойствами, например превращение обычной глины в камень при ее обжиге с получением стабильных свойств готового продукта.

Горными породами называются простые и сложные природные минеральные агрегаты, которые занимают значительные участки земной коры и отличаются большим или меньшим постоянством химического и минерального состава, структуры, а также определенными условиями залегания. Они слагают поверхностные слои земной коры мощностью 15—60 км и образуют естественные скопления ценного минерального сырья. В настоящее время в нашей стране ежегодно расходуется около 2 млрд. т горных пород на нужды промышленности строительных материалов.

¹ Глава в основном подготовлена доц., канд. техн. наук Рыбьевой Т. Г.

8.2. ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ МИНЕРАЛЫ

Для производства строительных материалов и изделий горные породы добывают из поверхностных слоев земной коры, в состав которой входят все химические элементы: кислород — до 47%, кремний — до 26%; алюминий и железо составляют соответственно 8 и 5%, суммарное количество кальция, магния, натрия и калия не превышает 11% общей массы горных пород. Остальные элементы составляют приблизительно 3% состава земной коры. В чистом виде химические элементы встречаются в ней редко; подавляющее большинство их находится в виде соединений с однородным химическим составом, структурой и свойствами, которые называются *минералами*. Содержащиеся в составе горных пород минералы разделяют на породообразующие и второстепенные. Первые, примерно 40—50 минералов, участвуют в образовании горных пород и обуславливают их свойства; вторые встречаются в них только в виде примесей. Среди породообразующих минералов выделяются первичные и вторичные. Первичные возникли при формировании пород, вторичные — позже, как продукты видоизменения первичных минералов.

Природные минералы находятся в основном в твердом состоянии и имеют преимущественно кристаллическое строение с закономерным расположением частиц (ионов, атомов, молекул) в пространстве. Реже они встречаются в виде аморфных веществ с беспорядочным пространственным расположением частиц. Каждый минерал возникает как химическое соединение в природе в условиях, характеризующихся определенным сравнительно узким значением температуры, давления и концентрации химических компонентов в системе. Он сохраняется неизменным до тех пор, пока не происходит заметного изменения этих условий. И тогда минерал может быть подвергнут изменению, разрушению или замещению в горных породах другими минералами, т. е. природными химическими соединениями, устойчивыми в новых условиях. Впрочем, среди минералов хорошо известны и те немногие их разновидности, которые способны сохранять свою устойчивость в достаточно широких пределах изменения внешних условий, например алмаз, графит, корунд, рутил и др.

Твердые минералы обладают рядом характерных свойств, оказывающих большое влияние на технические свойства пород: твердость, спайность, излом, блеск, окраска, плотность. Эти свойства зависят от строения и прочности связей в кристаллической решетке.

Твердость характеризует поверхностную энергию минерала. Она оценивается по шкале Мооса, которая состоит из десяти минералов, расположенных в порядке возрастания их твердости: тальк, гипс, кальцит, флюорит, апатит, полевой шпат, кварц, топаз, корунд и алмаз. Определяют твердость пробой на царапанье; выражается она порядковым числом соответствующего эталона в шкале, оставляющего царапину на испытуемом образце. Более точную оценку твердости получают специальными склерометрическими приборами. Показатель твердости материала имеет большое практическое значение и косвенно позволяет судить о механических свойствах природного камня.

Спайность проявляется в виде способности минералов раскалываться по определенным направлениям с образованием гладких зеркальных поверхностей — плоскостей спайности. Одни минералы легко расщепляются на тончайшие пластинки в одном или нескольких направлениях, у других она проявляется плохо или совсем отсутствует. Спайность служит важным диагностическим признаком минералов и вместе с показателями твердости способствует предварительной оценке механических свойств природных материалов.

Излом является характеристикой неровной поверхности раскола минерала, прошедшего не по направлениям спайности. Среди разнообразных видов излома выделяются ровный, ступенчатый, неровный, раковистый, занозистый, землистый. Изломы позволяют не только диагностировать, но и оценивать свойства минералов.

Окраска — важный диагностический признак минералов, так как для большинства их она сохраняется постоянной и вместе с тем имеет определяющее значение для декоративной

характеристики природного камня. Окраска обусловлена присутствием красящих элементов (хромофор) в составе минерала, в частности Cr, Mn, Fe и др., или посторонних тонко окрашенных примесей, иногда газовых пузырьков. Возможно также появление ложной окраски, вызываемой интерференцией световых лучей при их отражении от внутренних плоскостей трещин спайности.

Блеск возникает в результате отражения световых лучей от поверхности минерала и имеет важное диагностическое значение. Одновременно он является характеристикой декоративных или ювелирных достоинств минерала. Блеск появляется под влиянием двух факторов: показателя преломления светового луча при прохождении в кристаллической среде минерала и коэффициента его поглощения данной средой. При наибольшем показателе преломления у прозрачных минералов возникает очень сильный алмазный (неметаллический) блеск. Вещества с небольшим показателем преломления (например, сернистые минералы) обычно непрозрачны и характеризуются металлическим блеском. В зависимости от величины показателя преломления и характера отражающей поверхности минералы приобретают стеклянный, перламутровый, жирный, шелковистый, матовый и другие виды блеска, которые учитываются при отборе минерального сырья для практических целей. В природе преобладают минералы со стеклянным блеском, имеющие средние показатели преломления 1,3—1,9.

Плотность (истинная)¹ колеблется у минералов от значений, меньших единицы (озокерит), до 20 и выше (осмистый иридий). Она зависит от химического состава и структуры, атомной массы элементов, их ионных радиусов и валентности. Числовые значения плотности помимо диагностических характеристик имеют практическую ценность при оценке качества минерального сырья и используются при его обогащении. Наибольшее распространение в природе имеют минералы с малой (от 2 до 4 г/см³) плотностью. Приводимое ниже описание наиболее распространенных и важных в породообразующем отношении минералов предусматривает характеристику представителей классов силикатов, оксидов и гидроксидов, карбонатов, сульфатов, сульфидов и самородных минералов.

Силикаты являются солями различных кремниевых кислот и относятся к сложным химическим соединениям, содержащим в своем составе элементы K, Na, Ca, Mg, Fe, Mn, Al, Si, O, H и др. Однако для них более характерным является не химический состав, а особенности кристаллического строения с наличием ионной кристаллической решетки. Основной структурной единицей этой решетки является кремнекислородный тетраэдр (SiO₄)⁴⁻, размеры которого почти всегда строго постоянны (рис. 8.1). Характерной особенностью кремнекислородных тетраэдров является способность иона Si частично заменяться ионом Al с появлением в кристаллической решетке других алюмокислородных тетраэдров (AlO₄)⁴⁻ с образованием каркасных алюмосиликатов. К наиболее важным представителям этого класса относятся полевые шпаты, нефелин, роговая обманка, авгит, слюды, гидрослюды, а также вторичные силикаты — тальк, асбест, каолинит, монтмориллонит.

Полевые шпаты по химическому составу — алюмосиликаты калия, натрия, кальция. В горных породах распространен калиевый полевой шпат K(AlSi₃O₆), именуемый ортоклазом. Характерная его особенность: между двумя плоскостями спайности у него образуется прямой угол, и его название означает прямораскалывающийся (орто — прямо, клаз — раскалывание). Не менее распространены полевые шпаты и в виде плагиоклазов, т. е. косораскалывающихся.

¹ Далее истинная плотность обозначается как плотность.

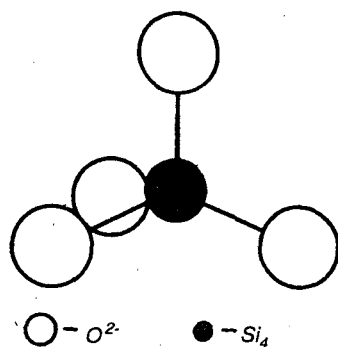


Рис. 8.1. Кремнекислородный тетраэдр

К двум разновидностям этих полевых шпатов относятся альбит — алюмосиликат натрия $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ и анортит — алюмосиликат кальция $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)_8$. Ортоклаз имеет светлую окраску, стеклянный блеск, высокую твердость (6—6,5)¹, совершенную спайность в двух направлениях и плотность от 2,5 до 2,7 г/см³. На поверхности земли ортоклаз постепенно выветривается и превращается в глинистый минерал. Как породообразующий компонент ортоклаз придает повышенную твердость и прочность горной породе. Высокосортные залежи калиевых полевых шпатов имеются в Карелии, на Урале, в Сибири и других районах нашей страны.

Плагииоклазы в природе существуют в виде многочисленных разновидностей — от чистого анортита до чистого альбита, причем чем выше содержание анортита в составе плагииоклаза, тем выше показатель его основности. Так, при содержании в составе плагииоклаза от 0 до 30% анортита он является кислым плагииоклазом, от 30 до 60% — средним и от 60 до 100% — основным. Плагииоклазы бывают белого или серовато-белого, реже серого и черного цветов со стеклянным блеском и характерной для них иризацией в синих и зеленоватых тонах. Отличаются высокой твердостью (6—6,5), хрупкостью и плотностью в пределах 2,61—2,76 г/см³, совершенной спайностью. Плагииоклазы неустойчивы к химическому выветриванию на поверхности земли и переходят в глинистые соединения. Применяются в качестве особо ценного декоративного и облицовочного материала (Лабрадор). Их месторождения известны на Украине и Урале.

К числу каркасных алюмосиликатов, объединенных кремнеземом, относится также нефелин $\text{Na}(\text{AlSiO}_4)$, который входит как породообразующий минерал в щелочные магматические породы (нефелиновые сиениты, нефелиниты и др.). Нефелин — бесцветный или чаще серовато-белый минерал с разнообразными оттенками, имеет твердость 5—6 и невысокую плотность (2,6 г/см³), несовершенную спайность, неровный или раковистый излом. Легко выветривается на поверхности земли, превращаясь в каолинит и вторичные образования карбонатного, сульфатного состава и др. В контакте с богатейшими апатитовыми месторождениями нефелиновые породы нередко образуют крупные массивы, имеющие промышленное значение; используются при производстве цемента, стекла; из нефелиновых отходов с помощью обогащения получают глинозем, соду, силикагель, ультрамарин и др. Месторождения этих пород известны на Кольском полуострове (Хибины).

К ленточным силикатам (амфиболам) относится роговая обманка — важный породообразующий компонент магматических и метаморфических пород. В ее состав входят элементы Na, Ca, Mg, Fe, Al, Si, O, H, образуя сложную химическую формулу. Роговая обманка окрашена в темно-бурые, зеленые и черные цвета с шелковистым или стеклянным блеском. Имеет высокую твердость (5,5—6) и плотность (3,1—3,36 г/см³), характеризуется совершенной спайностью и занозистым изломом. Она отличается высокой вязкостью и большой прочностью, поэтому присутствие ее придает породам

¹ Здесь и далее характеристика твердости приводится по шкале Мооса.

повышенные прочность и ударную вязкость. Наиболее известные месторождения роговой обманки имеются на Урале.

Авгит — магнезиально-железистый силикат $\text{Ca}(\text{Mg, Fe, Al})[(\text{Si, Al})_2\text{O}_6]$ относится к цепочечным силикатам (пироксенам) и является важным породообразующим минералом основных магматических пород. Обычно окрашен в темно-зеленый, черно-бурый или черный цвет со стекляннным блеском. Имеет твердость 5—6 и плотность 3,2—3,6 г/см³, совершенную спайность, повышенные вязкость и прочность. Присутствие авгита в породах сообщает им высокую сопротивляемость механическим воздействиям. Встречается на Урале.

3 группу слоистых силикатов входят многочисленные представители со слоистым, листоватым или чешуйчатым строением. Наиболее распространены в породах слюды (особенно биотит и мусковит), гидрослюда, в частности вермикулит, а также тальк, асбест каолинит, монтмориллонит.

Слюда относится к группе алюмосиликатов и как породообразующие компоненты входят в состав магматических и некоторых метаморфических пород. Физические свойства слюд близки: они легко расщепляются на очень тонкие, гибкие и упругие пластинки. Выделяются две разновидности слюд, отличающихся по химическому составу: мусковит и биотит.

Мусковит — белая слюда $\text{KAl}_2(\text{OH})_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$ встречается в магматических и метаморфических породах. Имеет перламутровый блеск, весьма совершенную спайность в одном направлении, благодаря чему легко расщепляется на тонкие и прозрачные упругие листочки, невысокую твердость (2—3) и плотность 2,8—3,1 г/см³. Мусковит относительно стоек химически и при выветривании обычно переходит в россыпи без заметного изменения. Используется как отличный электроизоляционный материал, а в строительстве — в виде слюдяного порошка (скарпа), как посыпочный материал при изготовлении кровельных материалов (рубероида), огнеупорных красок, керамических изделий и т. п. Достаточно крупные месторождения мусковита имеются на Кольском полуострове, Украине, Среднем Урале, в Восточной Сибири.

Биотит — черная или бурого цвета железисто-магнезиальная слюда $\text{K}(\text{Mg, Fe})_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}][\text{OH, F}]_2$ широко распространена в кислых магматических и метаморфических породах. Имеет небольшую твердость (2—3), весьма совершенную спайность в одном направлении, легко расщепляется на тончайшие упругие пластинки. В природе образует преимущественно пластинчато-чешуйчатые и зернистые скопления, является химически нестойким минералом. Месторождения биотита известны на Урале, в Забайкалье и др.

Гидрослюда — слюдopodobные минералы, содержащие значительное количество связанных молекул H_2O между слоистыми пакетами, образованными кремнекислородными тетраэдрами в кристаллической решетке, которые сравнительно легко удаляются при нагревании. Гидрослюда являются результатом выветривания мусковита, биотита и других минералов группы слюд и рассматриваются как промежуточные соединения между слюдами и глинистыми минералами слоистой структуры. Химический состав гидрослюд непостоянный, так как изменяется количественное содержание катионов, связывающих упомянутые выше слоистые пакеты, и межпакетной воды.

Среди этих минералов наибольшее практическое значение имеет вермикулит золотистого или коричневого цвета $(\text{Mg, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{OH})_2[(\text{Al, Si})_4\text{O}_{10}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Он имеет низкую твердость (1—1,5) и плотность (2,4—2,7 г/см³), совершенную спайность и способен разделяться на тонкие гибкие неупругие пластинки. При прокаливании, в интервале температур от 900 до 1100°C, его молекулярная вода превращается в пар с образованием внутреннего давления, под влиянием которого происходит расслоение слоистых пакетов и разделение их на червеобразные столбики или нити с поперечным делением на тончайшие чешуйки. Образование огромного количества воздушных прослоек в кристаллической решетке сопровождается сильным (в 15—25 раз) увеличением объема вспученного вермикулита и уменьшением его средней плотности до 0,1—0,3 г/см³. Вермикулит

является хорошим теплоизоляционным и звукопоглощающим материалом. Крупные месторождения его находятся на Украине, Урале и Кольском полуострове.

К группе вторичных слоистых силикатов относятся довольно широко распространенные в природе тальк, асбест, каолинит и монтмориллонит.

Тальк $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$ образуется при изменении магнезиальных силикатов и алюмосиликатов природными горячими растворами и является породообразующим минералом тальковых сланцев. Окрашен в белый или бледно-зеленый цвет, имеет стеклянный блеск с перламутровым отливом, очень низкую твердость (меньше 1), плотность 2,7—2,8 г/см³, весьма совершенную спайность и легко расщепляется на гладкие неупругие пластинки, жирный на ощупь. Тальк применяют в порошкообразном виде в качестве наполнителей в производстве пластмасс, паст, глазурей и кислотоупорных изделий. Камневидный тальк используют для огнеупорной футеровки. Промышленные месторождения его известны на Урале.

Асбест встречается в виде нескольких разновидностей, но наибольшее применение для практических целей имеет хризотил-асбест $\text{Mg}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_{18}$. Для асбеста характерна параллельно-тонковолокнистая структура с длиной волокон, колеблющейся от десятых долей миллиметра до 20—25 мм, иногда до 50—150 мм. Он имеет зеленовато-желтый, а в распушенном состоянии снежно-белый цвет, невысокую твердость (2—3) и способен расщепляться на прочные волокна толщиной меньше 0,0001 мм. Отличается высокой огнестойкостью и щелочеупорностью, плохо проводит тепло и электричество. Хризотил-асбест образуется из ультраосновных оливиновых, а также карбонатных пород под влиянием природных горячих растворов. Наиболее ценным считается длиноволокнистый асбест с длиной волокон более 8 мм, используемый при производстве несгораемых тканей, автомобильных тормозных лент, асбесторезиновых изделий и др. Для изготовления асбестоцементных изделий, теплоизоляционных труб, панелей и т. п. применяют асбест с длиной волокон 2—8 мм. Из мелкого асбестового волокна получают обмазочную теплоизоляцию, огнестойкие краски, штукатурные растворы и др. Значительные месторождения асбеста известны на Украине, Урале, в Забайкалье, Саянах и других районах страны.

Каолинит $\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$ является главным минералом многих глинистых пород. Имеет совершенную спайность, легкую расщепляемость на тонкие неупругие чешуйки, весьма низкую твердость (меньше 1) и невысокую плотность — около 2,6 г/см³. В природе он встречается в виде рыхлых чешуйчатых или плотных тонкозернистых агрегатов белого цвета с различными оттенками и матовым блеском. Каолинит образуется преимущественно путем выветривания алюмосиликатов (полевых шпатов, слюды и др.), содержащихся в породах под влиянием воды и CO_2 , отличается достаточной устойчивостью на поверхности земли и, накапливаясь, образует мощные толщи глинистых пород. Основной потребитель каолиновых глин — керамическая промышленность. Они используются при производстве тонкой фарфоровой и фаянсовой керамики. Каолиновые наполнители широко применяют при производстве пластмасс, эмульгаторов, красителей и т. д. Месторождения каолиновых глин распространены на Урале, Украине, в Казахстане, Подмосковье и др.

Монтмориллонит $(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ отличается непостоянным химическим составом, который зависит от содержания воды в атмосфере. Образуется в условиях щелочной среды при разложении вулканических пеплов и туфов в морской воде. Имеет подвижную кристаллическую решетку, вследствие чего приобретает способность к сильному набуханию в присутствии воды и увеличению ее размеров почти в 3 раза, а при нагревании — к постепенному высыханию и значительной усадке. Монтмориллонит имеет белую окраску с разнообразными оттенками, матовый блеск (в сухом состоянии), совершенную спайность чешуек, непостоянную плотность, незначительную твердость (меньше 1) и жирность на ощупь. Он широко распространен на поверхности земли, преимущественно в районах выветривания основных магматических пород; отличается

сравнительной устойчивостью к химическому выветриванию. Являясь составной частью глинистых пород, сообщает им повышенные набухаемость и адсорбируемость. В чистом виде используется как адсорбент (отбеливатель), наполнитель, эмульгатор в резиновом, пластмассовом, керамическом и других производствах. Высококачественные месторождения монтмориллонитовых глин находятся на Кавказе, в Крыму, Приднепровье, Закарпатье.

Оксиды являются соединениями металлов и металлоидов с кислородом. Наиболее распространенный минерал этого класса — кварц SiO_2 , встречающийся в трех главных модификациях: α -кварц, тридимит и кристобалит. Основой его кристаллической структуры служат кремнекислородные тетраэдры, которые образуют прочную решетку каркасного типа, характерную для всех трех его модификаций. Образование кварца связано как с магматическими процессами в недрах земли, так и выпадением из холодных растворов на ее поверхности. Наиболее изученным является α -кварц, который называют просто кварцем. Он устойчив при температуре ниже 573°C . Тридимит устойчив в температурном интервале $870\text{—}1470^\circ\text{C}$, а, кристобалит — при температуре ниже 1713°C . Свойства этих модификаций зависят от неплотной упаковки ионов кислорода в кремнекислородных каркасах. При одном и том же способе сцепления кремнекислородных тетраэдров друг с другом через их вершины между тетраэдрами появляются пустотки, которые в низкотемпературном кварце обладают малыми размерами, а в высокотемпературных, более рыхло построенных тридимите и кристобалите, они крупнее. Поэтому α -кварц значительно плотнее — $2,65\text{ г/см}^3$, чем тридимит (2,30) и кристобалит (2,27), и тверже (7), чем последние (соответственно 6 и около 7). В прямой зависимости от строения находятся и их оптические свойства. Чистый кварц — бесцветный минерал, но может приобретать различную окраску в зависимости от содержания механических примесей. Отличается высокой твердостью (7), несовершенной спайностью, раковистым изломом. Как породообразующий минерал кварц входит в магматические, осадочные и метаморфические породы. Он является химически стойким минералом и накапливается в виде мощных осадочных отложений (песка, песчаника). Повсеместное распространение кварца способствует широкому использованию его в стекольной промышленности, а в виде природного камня (кварцитов, песчаников) — в качестве стойкого облицовочного и конструкционного строительного материала. Кварц является хорошим абразивом, а также используется как сырье для производства оптических приборов, химической посуды и т. п. Многочисленные месторождения кварца известны на Урале, Памире, в Забайкалье, на Украине, Кавказе.

В природе часто встречается гидратированный аморфный кремнезем — опал $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Содержание воды в нем колеблется от 1 до 5% и иногда выше. В чистом виде он бесцветен, но при наличии примесей приобретает разные оттенки, имеет стеклянный, а у пористых разновидностей матовый блеск, низкую плотность ($1,9\text{—}2,5\text{ г/см}^3$) и среднюю твердость (5—5,5). Сравнительно легко растворяется в щелочах, например в КОН, но в кислотах не разлагается. Условия образования его различны: осаждение из горячих растворов и гейзеров (кремнистые туфы), выветривание ультраосновных магматических пород, коагуляция и седиментация золей кремнезема в морских бассейнах, накопление продуктов жизнедеятельности морских организмов и т. д. Осадочными опалсодержащими породами являются трепелы, диатомиты, опоки, мергели и др., применяемые как гидравлические добавки при производстве цемента, абразивов, а также для изготовления керамических изделий и легких блочных материалов. Они широко распространены на Урале, в Казахстане, Среднем Поволжье, Закавказье и др.

Из группы оксидов и гидроксидов железа практическое значение имеют гематит и лимонит. Первый — кристаллический, второй — аморфный минералы. Гематит (красный железняк) $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ содержит до 65—70% железа, а в сплошных гематитовых рудах обычно колеблется от 50 до 65%. Кристаллический гематит железо-черного, а аморфный — ярко-красного цвета, имеет полуметаллический блеск, высокие твердость (5,5—6), плотность

(5—5,2 г/см²), неровный излом; хрупок. От других железистых минералов отличается по вишнево-красной черте, оставляемой на неглазурованном фарфоре. Гематит — химически стойкий минерал, образует мощные месторождения железной руды, являющейся ценным сырьем для получения чугуна и стали. Порошкообразный гематит используют в качестве красок при отделочных строительных работах (входит в состав красного пигмента или является компонентом масляных и водных красок). Известные месторождения гематитовых руд находятся в районе Курской магнитной аномалии, на Северном Урале, на Украине.

Лимонит (бурый железняк) $\text{HFeO}_3 \cdot \text{aq}$ представляет собой сложный минерал, включающий гидроксиды железа и глинистые минералы с различными примесями, содержащий от 10 до 14% воды. Сложный и переменный состав лимонита отражается на его свойствах, в том числе на твердости (изменяется в пределах 1—4), широком интервале оттенков его бурой окраски и плотности (3,3—4 г/см³). Образуется лимонит преимущественно на поверхности земли при окислении и разложении железосодержащих минералов. Большие скопления лимонита являются месторождениями бурых железняков — сырья для производства чугуна и стали. Их разработка экономична при содержании в этих рудах до 35—40% железа. Крупные месторождения их известны на Керченском полуострове, Урале.

Практическое значение имеет оксид титана, именуемый рутилом TiO_2 . Существует три известных модификации этого соединения, но рутил среди них является наиболее устойчивой как при высокой, так и при низких температурах. Химический состав — Ti 69%, часто присутствуют Fe в виде окиси или закиси, иногда Zn (до 1,5%) и др. Рутил, богатый примесью Fe, в виде твердого раствора называется нигрином (FeTiO_3). Цвет рутила обычно темно-желтый, бурый, красный; у нигрина — черный. Блеск алмазный до металловидного, твердость 6, хрупок, спайность — совершенная. Встречается в ряде месторождений Ильменских гор (Южный Урал), в Казахстане, а в россыпях — на Среднем Урале. Из иностранных следует отметить месторождения рутила в Северной Каролине (США), а в виде нигрина — в Норвегии. Употребляют для выплавки ферротитана (для стойких при ударах сортов стали), в керамике в качестве бурой краски, для изготовления титановых белил и др.

К группе оксидов также относится природный минерал, значение которого трудно переоценить как в строительном материаловедении, так и в жизни на Земле. Этот продукт окисления водорода $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$ получается в виде льда, воды и водяного пара.

Лед — H_2O , содержит водорода 11,2 и кислорода 88,8%. Иногда содержит газообразные и твердые механические примеси. Является, водой в твердом кристаллическом состоянии. Возможно образование кристаллов льда десублимационным путем, т. е. непосредственно из парообразного состояния.

В природе этот оксид — очень распространенный минерал, обладает молекулярной кристаллической структурой, хотя определенную роль играют и водородные связи, образующиеся между молекулами H_2O . Они начинают разрываться при повышении температуры льда до 0°C и выше, полностью исчезают при высокой температуре воды. В больших скоплениях лед имеет голубоватый оттенок, но бесцветен и со стеклянным блеском, прозрачный. Спайность отсутствует, твердость 1,5, хрупкий. Кристаллы льда имеют различное очертание, что зависит от условий его образования — в атмосфере (снежинки), в ледяных пещерах, в условиях вечной мерзлоты и др., но в целом его плотность ниже воды (0,917) в связи с низким координационным числом каждой молекулы H_2O , равным 4 (ажурная структура льда). Хорошо ограненные кристаллы льда встречаются редко. Обладает достаточно высокой прочностью, что позволяет использовать толстый ледяной слой в зимнее время как сравнительно надежный «строительный материал», например при возведении временных палаточных поселков, дорожно-мостовых переходов и т. п.

Вода по химическому составу и происхождению разделяется на морскую (с растворенными в ней солями), пресную речную и озерную, поверхностную дождевую и грунтовую, подземную, минеральных источников (углекислую, сероводородную, железистую и др.).

Критическая температура для чистой воды равна 374°C, критическое давление 21,7 МПа. Плотность чистой воды равна 1 при 4°C, она понижается с уменьшением температуры (этим она отличается от других жидкостей, у которых она возрастает согласно линейному уравнению Д.И. Менделеева: $d_t = d_0(1 - kt)$, где d_t — плотность при $t^\circ\text{C}$; d_0 — плотность при 0°C; k — модуль термического расширения жидкости).

Вода служит не только средой (например, растворяющей) для многих физических явлений, но и важнейшим агентом химических процессов в земной коре. Электролитическая диссоциация воды на катионы H^{1+} и анионы $(\text{OH})^{1-}$ и гидролиз связаны с образованием гидрооксидов, основных и кислых солей. Она способствует формированию гидрогелей в природе, протеканию метаморфических процессов и, в частности, перекристаллизации минеральных веществ. В них она удерживается как конституционная, прочно связанная с кристаллической решеткой минерала в виде ионов OH^- и H^+ (например, талька, серпентина, брусита, каолинита и др.), а также в виде нестойкого иона оксония H_3O^{1+} , от которого легко отщепляется H_2O с выделением H . Вода удерживается еще и как кристаллизационная в виде молекул H_2O , что является следствием гидратации с образованием кристаллогидратов (например, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и др.). К этому же типу относится и цеолитная вода, располагающаяся в пустотах кристаллов минералов группы цеолитов — водных алюмосиликатов, главным образом Ca и Na (например, шабазит, нитролит и др.). Удерживается вода и как адсорбционная, молекулы которой физико-химически и механически притягиваются многими минералами под влиянием поверхностной энергии. Такая вода типична для силикатов со слоистой структурой (например, в монтмориллоните и др.).

Вода имеет огромное значение и в органическом мире, в частности, в произрастании лесов как потенциального вида строительной древесины, в развитии растений. Наконец, вода служит неотъемлемым компонентом при производстве строительных материалов, изделий и конструкций.

Водяной пар — газообразное состояние H_2O . В природе и, в частности, в минералах и горных породах встречается значительно реже. Поэтому водяной пар рассматривается в соответствующих главах настоящей книги только в связи с определенными технологиями, например производством автоклавных силикатных материалов и изделий.

Карбонаты являются солями угольной кислоты и широко распространены как породообразующие компоненты осадочных и метаморфических пород. Основой кристаллической структуры карбонатов служат плоские комплексные анионы $(\text{CO}_3)^{2-}$, которые, связываясь друг с другом, образуют цепочечные, слоистые или каркасные структуры. В кристаллических решетках они участвуют как самостоятельные элементы, не распадающиеся даже при растворении минерала. Наиболее распространенными являются кальцит, магнезит, доломит, натрит.

Кальцит CaCO_3 — кристаллический минерал ромбоэдрической, пластинчатой формы, бесцветный или молочно-бурой окраски с различными оттенками, стекляннм блеском, низкими твердостью (3) и плотностью (2,6—2,8 г/см³), совершенной спайностью по трем направлениям и ровным изломом. Кальцит слабо растворим в воде, но под влиянием углекислоты, часто содержащейся в воде (например, грунтовой), переходит в бикарбонат кальция: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, который растворяется в воде примерно в 100 раз легче, чем сам кальцит. Поэтому породы, содержащие кальцит, быстро разрушаются при контакте с водой, насыщенной углекислотой.

Кальцит легко распознается по реакции «вскипания» под действием разбавленной соляной кислоты, которая вызывается бурным выделением углекислого газа и служит простым приемом распознавания карбонатных пород. В природе кальцит встречается в

виде кристаллических агрегатов, друз (сростков), натеков, но преимущественно распространен в виде мощных отложений известняков, мрамора и др. Условия его образования разнообразны и, в основном, связаны с накоплением известняковых илов — продуктов жизнедеятельности растительных и животных организмов в морских бассейнах (органогенные известняки), а также с отложением, под влиянием коагуляции, коллоидных растворов углекислой извести в виде тонких пленок на поверхности частиц, взвешенных в движущейся воде (химические известняки). Месторождения различных видов кальцита, а также разнообразных карбонатных пород — мела, мраморов — встречаются в Карелии, на Украине, в Донбассе, на Урале и др. Они являются ценным поделочным материалом, сырьем для производства цемента, извести, огнеупоров и т. п.

Магнезит (MgCO_3) по структуре и форме кристаллов сходен с кальцитом, но распространен в природе значительно реже. Окрашен в белый цвет с желтоватым или сероватым оттенком, имеет стеклянный блеск, среднюю твердость (4—4,5) и невысокую плотность (2,9—3,0 г/см³), а также совершенную спайность по ромбоэдру. В отличие от кальцита при воздействии HCl реакции вскипания не обнаруживает. Образуется магнезит преимущественно под влиянием горячих магнезиальных растворов на известняк и при выветривании магнезиальных силикатов (серпентинитов). В природе встречается в виде сплошных мраморовидных (кристаллических) и плотных (аморфных) масс, которые имеют большое промышленное значение, особенно при производстве высокоогнеупорных изделий (см. гл. 17).

Доломит [$\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$] в структурном отношении сходен с кальцитом. Окрашен в белый или серовато-белый/цвет со стеклянным блеском, имеет среднюю твердость (3,5—4), невысокую плотность (1,8—2,9 г/см³), совершенную спайность и ступенчатый излом. Вскипает с холодной HCl только в порошке. Доломит широко распространен в природе как породообразующий компонент доломитов и доломитизированных известняков.

Натрит $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ — бесцветный или окрашенный в белый цвет минерал со стеклянным блеском, небольшими твердостью — 1,5, плотностью (1,4—1,5 г/см³) и несовершенной спайностью. HCl обнаруживает бурную реакцию вскипания. При нагревании растворяется в собственной кристаллизационной воде. Он образуется в некоторых соляных озерах, богатых натрием, при избытке растворенного CO_2 . Применяется при производстве стекла, в металлургии и др. Обычно встречается в виде плотных и зернистых масс. Содовые месторождения распространены в Восточной Сибири, Казахстане и др.

Сульфаты — соли серной кислоты, образующиеся в поверхностных слоях земли. Среди представителей этого класса имеется мало соединений, достаточно устойчивых в земной коре. Основной структуры сульфатов являются тетраэдрические анионные группы $(\text{SO}_4)^{2-}$, которые, связываясь друг с другом с помощью различных катионов, молекул воды и др., образуют разнообразные островные, каркасные, цепочечные, слоистые структуры. Сульфаты характеризуются невысокой твердостью и прочностью, высокой спайностью, светлой окраской. Для строительных целей используют ангидрит, гипс, барит и мирабилит.

Ангидрит CaSO_4 встречается в виде сплошных зернистых масс и является кристаллическим минералом голубовато-белого цвета со стеклянным блеском, имеет невысокую твердость (3—3,5), плотность около 3 г/см³, совершенную спайность и листоватый излом. Легко присоединяет в природных условиях воду, переходя в гипс с сильным (до 30%) увеличением объема. Является породообразующим компонентом в породах одноименного названия (см. 8.3).

Гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — кристаллический минерал, обычно слагающий в природе огромные мраморовидные скопления гипсовых пород. Он имеет белый цвет с разнообразными оттенками, малую твердость (1,5—2), низкую плотность (2,3 г/см³), весьма совершенную спайность и листоватый излом, отличается хрупкостью. Растворим в воде (одна часть гипса на две части воды) с максимумом растворимости при температуре 37—38°C и

понижением ее до минимума при 107°C и выше, что объясняется образованием нового соединения — полугидрата $\text{CaCO}_3 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. В генетическом отношении гипс относится к типичным химическим осадкам и образуется в высыхающих участках моря. Вместе с ангидритом его используют для получения вяжущих веществ (см. 9.1.3),

Барит (тяжелый шпат) BaSO_4 — весьма распространенный после ангидрита минерал с таблитчатой формой кристаллов. Он образует грубозернистые плотные массы белого и серого цвета со стекляннным блеском, невысокой твердостью (2,5—3,5), совершенной спайностью, неровным изломом и характерной для него хрупкостью. Отличается слабым пропусканием активных лучей (γ -лучи, рентгеновские и др.), вследствие чего используется для производства специальных бетонов. Образуется выпадением из горячих водных растворов, а также осаждением в виде нерастворимого сульфата бария в прибрежных участках моря. Барит применяют для производства специальных стекол, керамических эмалей, пластмасс, высокосортных красок. Месторождения его находятся на Урале, в Грузии, Туркмении, Казахстане, на Алтае.

Мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ содержит свыше 55% кристаллизационной воды, с которой связаны многие его свойства. Он образует бесцветные и прозрачные хрупкие кристаллы малой твердости (1,5—2) и низкой плотности (1,48 г/см³) с совершенной спайностью. Легко растворяется в воде, но также легко ее отдает в условиях сухой среды, превращаясь в безводный белый порошок. Является минералом химического генезиса (залив Кара-Богаз-Гол). При температуре 32°C растворяется в собственной кристаллизационной воде, а при взаимодействии с HCl не обнаруживает реакции «вскипания», чем и отличается от похожей на него соды. Используется в стекольной, химической промышленности (сода, краски и др.). Промышленными месторождениями являются Кара-Богаз-Гол (Каспий), озера Северо-Восточного Казахстана, Северный Кавказ, Крым.

Сульфиды являются соединениями серы с другими элементами, в том числе с железом. Кристаллическая решетка их построена ионами серы, в промежутках между которыми располагаются атомы или ионы металлов с ионной или ковалентной связью. Среди .сульфидов следует отметить пирит. FeS_2 , встречающийся в виде хорошо образованных кристаллов и больших зернистых скоплений — колчеданных залежей, а также вкраплений в многочисленных породах и т. д.) Цвет пирита в свежем изломе золотисто-желтый, блеск металлический; отличается высокой твердостью (6—6,5), средней плотностью (4,9—5,2 г/см³) и несовершенной спайностью. Он является самым распространенным сульфидом в земной коре и вместе с тем химически неустойчивым соединением на ее поверхности, где легко гидролизуется с образованием гидроксидов и серной кислоты, которая способствует быстрому разрушению пород. Пиритовые руды служат сырьем для получения серной кислоты, причем побочный продукт этого производства, пиритовые огарки, используют в технологии производства портландцемента, а также для получения красок или в качестве железной руды.

К представителям этого же класса относится киноварь HgS , хрупкий минерал красного цвета с сильным полуметаллическим блеском, невысокой твердостью (2—2,5). Она имеет высокую плотность (8,09—8,2 г/см³), не проводит электричества. Киноварь образуется исключительно как низкотемпературный гидротермальный минерал, связанный с молодыми вулканическими районами, где она встречается в виде пластовых залежей и жил; на поверхности земли устойчива и поэтому накапливается в россыпях. Применяется для приготовления красок, но главным образом служит сырьем для получения ртути. Месторождения киновари известны в Донбассе, на Кавказе, в Средней Азии и Западной Сибири.

Самородные минералы имеют практическое значение в виде шунгита, представляющего собой аморфный углерод C, образовавшийся в результате природного коксования угля при метаморфизме осадочных пород, содержащих пропластки органических остатков, в том числе каменного угля, битума и др. От графита отличается большими твердостью (3—4), плотностью и раковистым изломом. Цунгит инертен по отношению к агрессивным

средам, электро- и теплопроводен; способен вспучиваться при температуре обжига 110°C, образуя легкое пористое вещество. Входит в состав шунгитовых сланцев.

8.3. ГОРНЫЕ ПОРОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Горные породы — плотные или рыхлые агрегаты разнообразных минералов или обломков каких-либо пород. Они имеют относительно постоянный минеральный состав и специфическое внутреннее строение, определяемое структурными и текстурными особенностями. Под структурой породы понимают совокупность особенностей ее строения, которая обусловлена степенью кристалличности, формой и размерами зерен, а также соотношением составных частей минеральных компонентов и цемента. Текстура же характеризуется совокупностью признаков, определяемых взаимным расположением и распределением составных частей породы в занимаемом ею объеме. Она отображает особенности ее внешнего облика: слоистость, сланцеватость, пористость, массивность, расцветку, декоративность (рис. 8.2). Породы могут быть мономинеральными, т. е. состоять из зерен одного минерала, и полиминеральными, когда произошло срастание двух или нескольких минералов, различных по химическому составу и свойствам. Все породы по происхождению разделяются на три типа:

магматические (первичные), образование которых связано с остыванием магмы (силикатного расплава сложного состава) в различных термодинамических условиях земной коры, определяемых совокупностью воздействия высоких температуры и давления, а также концентрацией минеральных компонентов, содержащихся в расплаве;

осадочные (вторичные) породы, сформированные на поверхности земли в условиях низкой температуры и атмосферного давления. Они являются результатом накопления продуктов разрушения других, ранее образованных пород, выпадения различных химических образований из водной среды и накопления продуктов жизнедеятельности растительных и животных организмов на суше и в воде;

метаморфические (измененные) породы, образовавшиеся из осадочных и магматических пород путем полного или частичного их преобразования под влиянием высоких температуры и давления, горячих минерализованных растворов и раскаленных газов, циркулирующих в земной коре, и др. Ниже приводится описание генетических типов пород.

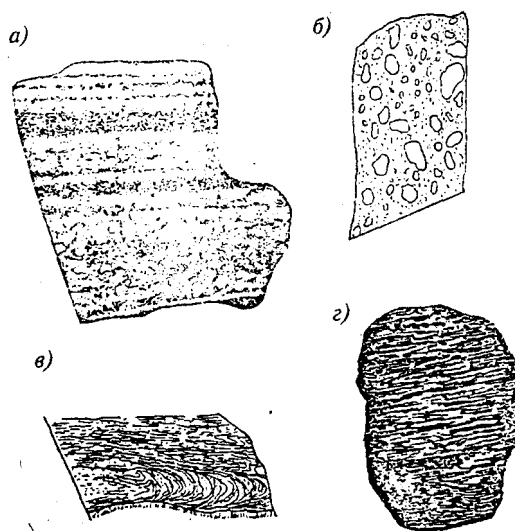


Рис. 8.2. Текстуры горных пород: а — полосчатая; б — неоднородная; в — флюидальная; г — сланцеватая

Магматические породы образовались в результате застывания магмы. Процесс их образования состоит в постепенной кристаллизации последней с последовательным выделением твердых минеральных компонентов при ее остывании до полного перехода в твердое состояние. При этом имеют огромное значение величины давлений, температура и содержание в ней минерализаторов — паров воды, углекислоты и др.

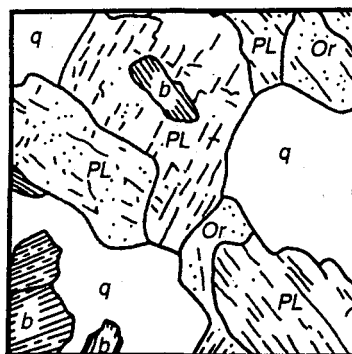


Рис. 8.3. Полнокристаллическая структура глубинных пород (гранит): *Or* — ортоклаз; *PL* — плагиоклаз; *q* — кварц; *b* — биотит

В зависимости от условий образования магматические породы разделяются на глубинные (интрузивные), излившиеся (эффузивные) и полуглубинные (гипабиссальные). Глубинные породы образуются на больших глубинах в условиях высоких температуры и давления, медленного и равномерного остывания магмы. Оно завершается формированием разновидностей с полнокристаллической структурой, массивной текстурой и равномерным распределением минеральных составных частей в массе породы, любые участки которой одинаковы по составу и структуре (рис. 8.3). Излившиеся породы появляются на поверхности земли в условиях низкой температуры и атмосферного давления при быстрой отдаче теплоты и быстром выделении газообразных веществ из лавы с образованием в ней многочисленных пор, сохраняющихся и после затвердевания. Поэтому они отличаются неполнокристаллической структурой с обилием аморфного стекла, неоднородной текстурой и чередованием в ее объеме участков с неодинаковым составом и структурой (рис. 8.4). Полуглубинные породы образуются на некоторой глубине от поверхности земли при изменяющемся режиме понижения температуры, в результате чего из магмы выделяются разноразмерные кристаллы одного и того же минерала: крупные, образовавшиеся в первую, и мелкие, появившиеся во вторую фазы кристаллизации. Структуры этих пород отличаются разнотернистостью и называются порфировидными.



Рис. 8.4. Неполнокристаллическая (порфировая) структура излившихся пород (альбитовый порфир): *AB* — альбит в скрытозернистой основной массе породы

В составе магматических пород существенное значение имеют оксиды SiO_2 ; Al_2O_3 ; FeO ; MgO ; CaO ; Na_2O ; K_2O ; H_2O и особенно первый, являющийся надежной характеристикой их химического состава. В зависимости от количественного содержания кремнезема все магматические породы разделяются на ультракислые — свыше 75%; кислые — от 65 до 75%; средние — от 52 до 65%; основные — от 40 до 52% и ультраосновные — менее 40% кремнезема. С уменьшением его содержания возрастает плотность и темнеет окраска магматических пород, так как в их составе увеличивается количество более тяжелых

железисто-магнезиальных силикатов. Главнейшими минералами магматических пород являются: кварц, полевые шпаты, плагиоклазы, нефелин, слюды, авгит, роговая обманка и др. Калиевые полевые шпаты и кислые плагиоклазы, кварц и слюды встречаются преимущественно в кислых породах; средние плагиоклазы и роговая обманка — в средних, а основные плагиоклазы и авгит — в основных породах.

Формы залегания магматических пород разнообразны. Глубинные породы залегают в виде батолитов — огромных (до 160 000 км²) массивов неправильной формы; штоков — массивов изометричной формы, отличающихся от батолитов меньшими (до 100 км²) размерами; лакколитов — грибообразных тел, соединяющихся подводными каналами с очагами магмы, и жил — плитообразных тел, образованных внедрением магмы в трещины пород. Типичными формами излившихся пород являются потоки, покровы и купола (конусы). Потоки представляют собой плоские тела, вытянутые в направлении движения жидких лав. Покровы имеют равновеликие длину и ширину и образуются при массовых трещинных излияниях лав на больших площадях. Купола — конусообразные массы излившихся пород, приуроченных к месту поверхностного излияния. Остывание магматических массивов сопровождается значительным сокращением их объема с появлением многочисленных, закономерно расположенных трещин, разбивающих массив на отдельные блоки различной величины и формы — отдельности. Установление направления трещин отдельности имеет большое практическое значение при разработке магматических пород: оно облегчает их добычу, упрощает механическую разделку пород и вместе с тем эти трещины в известной степени ограничивают возможность использования их трещиноватых разновидностей в строительных целях, так как они становятся досадными дефектами изготавливаемой штучной продукции.

Глубинные породы имеют высокие показатели прочности, средней плотности, а также незначительную пористость, с которой связаны весьма низкое водопоглощение, высокие теплопроводность и морозостойкость. Из этой группы рассматриваются граниты, сиениты, диориты, габбро, перидотиты и пироксениты, расположенные в порядке уменьшения в них кремнезема.

Граниты — широко распространенные в природе кислые породы, содержащие 65—75% SiO₂. В их состав входят калиевый полевой шпат (ортоклаз, микроклин) или кислый плагиоклаз в количестве от 40 до 60%, кварц от 20 до 40% и темнокрасные минералы (биотит, роговая обманка) от 5 до 20%, которые сообщают светло-серую или красную окраску этим породам. При большом количестве кварца граниты приобретают высокие твердость и хрупкость, а с увеличением содержания роговой обманки становятся более вязкими, однако легче выветриваются, особенно при наличии трещин. Присутствие пирита, большого количества слюды, отсутствие роговой обманки и помутнение окраски полевых шпатов являются нежелательными; для них характерны зернистая структура и массивная текстура. Их мелкозернистые разновидности отличаются более высокими плотностью и прочностью и меньше подвержены процессам выветривания. Предел прочности при сжатии у них колеблется от 100 до 250 МПа, при растяжении — от 2 до 7,5 МПа. Плотность гранитов составляет 2,9 г/см³, а средняя плотность 2500—2800 кг/м³. Они являются малопористыми породами (содержание пор от 0,5 до 1,5%); обладают низким водопоглощением (около 0,5% по объему); отличаются высокими морозостойкостью и сопротивляемостью истиранию; сравнительно легко поддаются механической обработке (разделке на изделия, шлифованию и полировке), хотя последняя с повышением содержания слюды затрудняется. Граниты недостаточно огнестойки: при нагревании до 900°C и выше они резко снижают прочность в связи с полиморфными превращениями кварца. Граниты находят самое широкое применение в строительстве. Их применяют для изготовления облицовочных плит цокольных этажей зданий, лестничных ступеней и полов, бордюрных камней, при строительстве мостов, гидротехнических сооружений, в качестве щебня для бетона, бутового камня при устройстве фундаментов зданий и др.

Крупные месторождения гранитов известны на Кольском полуострове, в Карелии, на Украине, Кавказе, Урале, Алтае, в Прибайкалье и т. д.

Сиениты — средние породы, содержащие до 65% SiO_2 . В отличие от гранитов в них отсутствует свободный кварц. Сиениты содержат до 50—70% кислых полевых шпатов (чаще ортоклаз) и около 25% цветных минералов (роговая обманка и биотит). Из-за отсутствия кварца они являются более мягкими и одновременно более вязкими породами вследствие значительного содержания роговой обманки. Сиениты окрашены обычно в светлые серые, розоватые или зеленоватые тона, имеют среднезернистую структуру и массивную однородную текстуру. Их предел прочности при сжатии составляет 150—180 МПа, а средняя плотность — 2600—2800 кг/см³. В связи с отсутствием кварца они обрабатываются и полируются лучше гранитов. Сиениты встречаются реже, что снижает их значение как строительного камня.

Диориты являются средними (60—65% SiO_2) породами, состоящими из средних плагиоклазов (до 75%) и роговой обманки (25%), наряду с которой могут присутствовать авгит, биотит. Окраска диоритов темно-серая, темно-зеленая до черной. Они характеризуются полнокристаллической равномерно-зернистой структурой и массивной текстурой, высокой прочностью при сжатии (180—300 МПа), большими плотностью и средней плотностью (до 2900 кг/м³), повышенной ударной вязкостью и достаточной устойчивостью к выветриванию, хорошей полируемостью. Эти свойства позволяют использовать диориты в качестве материалов, противодействующих различным вибрационным воздействиям (подпорные камни, фундаменты мостовых сооружений и др.), а также применять как ценный декоративный материал. Месторождения этих пород сравнительно редки и известны на Украине, Кавказе, Урале, в Средней Азии и реже в Крыму.

Габбро — основные породы, содержащие от 40 до 52% SiO_2 . Из них наиболее распространенными являются массивные полнокристаллические породы серого, темно-серого и темно-зеленого цвета, сложенные примерно равными количествами основного плагиоклаза и диаллага (разновидности авгита). Разновидности габбро, состоящие почти из одного основного плагиоклаза Лабрадора (более 85%), называются лабрадоритами. Они имеют серую и черную окраску с красивыми переливами в синих и зеленых тонах за счет иризации (отражения световых лучей от внутренних плоскостей спайности этого минерала), благодаря чему являются ценным декоративным и облицовочным материалом. Габбро — тяжелые породы с почти одинаковыми истинной плотностью и средней плотностью около 3100 кг/м³, прочностью при сжатии 200—280 МПа, отличающиеся высокой вязкостью, которая затрудняет их обработку. Месторождения габбро широко распространены в Карелии, на Кольском полуострове, Украине и др.

Перидотиты и пироксениты — ультраосновные бесполевошпатовые полнокристаллические породы, содержащие менее 40% SiO_2 и сходные по своим свойствам. Постоянными минеральными компонентами перидотитов являются оливин (30—70%), авгит и гиперстен, а пироксениты состоят почти целиком из последних. Обе породы часто содержат примеси рудных минералов, повышающих их среднюю плотность (3000—3400 кг/м³). Отличаются крупно- и среднезернистой структурой и массивной текстурой. Высокая твердость этих пород затрудняет разработку месторождений, а высокая вязкость осложняет их обработку, вследствие чего они применяются в качестве материалов особого назначения в специальных гидротехнических и других сооружениях, для внутренних интерьеров гражданских зданий, а также как поделочный и художественный материалы.

Излившиеся породы являются аналогами глубинных по составу, но сильно отличаются от них структурными особенностями и текстурой. Наличие неполнокристаллической и стекловатой структур, а также немассивной, часто пористой текстуры неблагоприятно отражается на стойкости их к выветриванию и стабильности прочностных показателей. Однако среди них обнаруживается немало плотных и прочных разновидностей, широко

применяемых в строительстве: кварцевые порфиры и липариты, бескварцевые порфиры (ортофиры) и трахиты; порфириты и андезиты; диабазы и базальты, расположенные в приведенном порядке по тому же признаку уменьшения кремнезема, что и в группе глубинных пород.

Кварцевые порфиры и липариты — излившиеся аналоги гранитов. Кварцевые порфиры относятся к древним, а липариты — к нововулканическим породам. От гранитов они отличаются порфировой структурой с наличием в мелкозернистой или стекловатой массе породы вкрапленников — крупных кристаллов кислого полевого шпата и реже кварца. Цветные силикаты наблюдаются в виде мелких чешуек биотита или тонких иголочек роговой обманки. Кварцевые порфиры окрашены в красновато-бурые тона и являются плотными породами со средней плотностью 2400—2600 кг/м³. Предел прочности при сжатии изменяется у них от 130 до 180 МПа в зависимости от содержания кварца и вулканического стекла, значительно повышаясь при увеличении первого и одновременном снижении второго в массе породы. От количества, размеров и степени разрушения вкрапленников зависит пористость пород, с которой связаны величина их водопоглощения и морозостойкости. Липариты — более легкие и пористые по сравнению с кварцевыми порфирами породы белого, светло-серого цвета, содержащие небольшие вкрапления кислого ортоклаза и среднего плагиоклаза, а также повышенное количество нераскристаллизованного вулканического стекла. Обе эти породы применяют для изготовления тесаного камня, бута, щебня и др. Декоративный вид и способность полироваться позволяют применять некоторые разновидности липаритов наравне с гранитами для отделочных работ. Месторождения этих пород имеются на Кавказе (Армения), Урале, в Средней Азии, а также в Казахстане.

Бескварцевые порфиры (ортофиры) и трахиты являются соответственно древними и молодыми излившимися аналогами сиенитов. У ортофилов сильно изменен минеральный состав в связи с появлением в нем вторичных минералов: каолинита, карбонатов, хлоритов и др., которые уплотняют породу, заполняя ее пустоты, и способствуют образованию вторичной мелкозернистой структуры. Бескварцевые порфиры окрашены в серовато-зеленый или красновато-бурый цвета. Трахиты — пористые и сильно шероховатые породы белой, серой, желтоватой окраски с ясно выраженной порфировой структурой. Соотношение вкрапленников (кислый полевой шпат) и вулканического стекла в породе сильно варьируется: встречаются плотные зернистые разновидности со средней плотностью от 2200 до 2600 кг/м³ и вместе с тем сильнопористые, напоминающие пемзу. Высокая пористость трахитов способствует их быстрому выветриванию. Они менее прочны, быстро истираются и маломорозостойкие. Предел прочности при сжатии обеих пород невелик и составляет 60—70 МПа. Их используют для изготовления бута, щебня, колотой и тесаной шашки, а также как кислотоупорные материалы. Красивые разновидности ортофилов (алтайские) применяют для отделочных работ. Эти породы хорошо поддаются обработке, но не полируются и быстро истираются. Их месторождения известны на Кавказе (Армения, Пятигорск), на Урале, Алтае, в Казахстане и др.

Порфириты и андезиты — плагиоклазовые излившиеся аналоги диоритов соответственно древне- и нововулканического возраста. Отличаются пористой текстурой и порфировой структурой с вкрапленниками плагиоклазов или роговой обманки, повышенной выветрелостью и наличием вторичных силикатов — серицита, хлорита и др. Заполняя поры пород, они окрашивают их в сероватые и зеленоватые тона, вследствие чего порфириты называют зеленокаменными породами. Свежие порфириты являются плотными породами со средней плотностью до 2500—3000 кг/м³ и пределом прочности при сжатии 160—250 МПа. Андезиты — менее выветрившиеся серые, желтовато-серые или буроватые пористые породы, сложенные авгитом или роговой обманкой и средним плагиоклазом — андезином, которые встречаются в виде вкрапленников в основной массе плотной или пористой мелкозернистой породы. Порфириты и андезиты достаточно плотные (2700—3100 кг/м³) и прочные породы, с пределом прочности при сжатии от 140

до 250 МПа. Широкий разброс ее значений зависит от пористости. Высокие показатели прочности относятся главным образом к плотным роговообманниковым и авгитсодержащим разновидностям андезитов. Обе породы используют как дорожный камень; пористые легкие разновидности андезитов идут на изготовление стенового материала, из плотных андезитов получают кислотостойкие материалы. Красивые разновидности порфиритов применяют для отделочных работ. Порфириты распространены на Кавказе, Урале, в Средней Азии, на Алтае, Дальнем Востоке, а андезиты — на Украине, Кавказе, в Восточной Сибири.

Диабазы и базальты — излившиеся древне- и нововулканические аналоги габбро, отличающиеся от него своими структурными и текстурными особенностями.

Диабазы имеют скрытокристаллическую структуру, характерную тем, что промежутки между переплетенными кристаллами основного плагиоклаза (Лабрадора) заполнены мелкозернистой авгитовой массой. Они окрашены в зеленые и зеленовато-серые тона. В связи с большим содержанием железисто-магнезиальных силикатов диабазы отличаются значительной вязкостью, высоким пределом прочности при сжатии (от 300 до 450 МПа) и средней плотностью 2700—2900 кг/м³. Имеют средние значения твердости и обрабатываемости и хорошо полируются.

Базальты представляют собой черную плотную застывшую лаву, находящуюся в скрытокристаллическом или аморфном состоянии с зернистым строением и стекловатой массой. Она заполняет промежутки между зернами различных размеров. Наблюдаются также порфировые разновидности этих пород. В базальтах часто встречаются различные включения (ксенолиты), снижающие их качество как строительных материалов. Они являются твердыми и одновременно хрупкими трудно обрабатываемыми породами, их прочность варьируется в широких пределах от 110 до 500 МПа и в связи с большим содержанием стекла может резко падать; плотность составляет 3,1—3,3 г/см³, а средняя плотность — 3000—3300 кг/м³. Наиболее ценными считаются свежие мелкозернистые базальты, не содержащие стекла и оливина. Базальты являются хорошими кислотоупорными и электроизоляционными материалами и высоко ценятся как сырье для каменного литья. Литой камень базальтин используют для получения отделочных изделий, труб, химической аппаратуры, отличающихся кислотоупорностью, высокой прочностью (до 800 МПа) и долговечностью. Диабазы и базальты добывают в Карелии, на Украине, Кавказе, Урале, в Забайкалье, на Камчатке и др.

Среди излившихся пород заметное место занимают вулканические стекла: почти безводный аморфный черный или красно-бурый обсидиан; мелкопористый светло-серый или коричневый перлит с содержанием до 3—4% воды; зеленоватый или бурый смоляной камень (пехштейн) кристаллитного строения с большим количеством воды. В последние десятилетия из вулканических стекол получают вспученный перлит — легкий и пористый материал с хорошими звуко- и теплоизоляционными свойствами; применяют в виде заполнителей в легких бетонах, фильтрующих и изоляционных материалах, как сырье для получения высококачественных стекол. Самые крупные их месторождения находятся в Армении.

Особой разновидностью вулканических стекол является пемза, образовавшаяся при быстром остывании средних и кислых лав на поверхности воды или влажной почвы, сопровождаемом бурным выделением паров и газообразных компонентов. Она отличается высокой пористостью (до 60—80%) и легкостью (средняя плотность в пределах 300—900 кг/м³), малым пределом прочности при сжатии (от 1,5 до 6 МПа) и теплопроводностью 0,12—0,20 Вт/(м·К). Пемза негигроскопична, характеризуется достаточной морозо- и огнестойкостью. Используется как заполнитель в легких бетонах и гидравлическая добавка в производстве цемента. Месторождения ее известны на Северном Кавказе, в Армении, Средней Азии и на Камчатке.

К вулканогенным породам относят рыхлые вулканические пеп-лы, пески и сцементированные — вулканические туфы, туфовые лавы.

Вулканические пеплы — мелкие порошкообразные массы частиц неправильной формы, выброшенные во время извержений и осевшие на поверхности лавовых потоков, а также вокруг вулканических конусов. Они состоят из мельчайших обломков вулканического стекла и кристаллических зерен некоторых минералов, особенно кварца. Размеры частиц вулканических пеплов колеблются от 0,1 до 2 мм. В пеплах содержится свыше 65% частиц мельче 0,15 мм преимущественно кремнистого состава. Рыхлые массы, сложенные более крупными частицами (до 5 мм), называются вулканическими песками. Вулканические пеплы являются активными минеральными добавками при производстве цементов. Их месторождения распространены в Крыму (Карадаг).

Вулканические туфы образуются путем цементации и уплотнения вулканических пеплов и другого твердого материала. Цементом служат вулканический пепел, кремнезем, глина и продукты разложения пепла. Они различны по строению и характеризуются непостоянными химическими и физико-механическими свойствами. Наиболее ценными считаются камневидные туфы липоритового состава с повышенным содержанием растворимого кремнезема — трассы, употребляемые в качестве гидравлических добавок к цементу. Рыхлые землистые разновидности их называют пуццоланами. Месторождения вулканических туфов известны в Армении, Крыму (Карадаг).

Туфовые лавы образуются при быстром вспенивании изливающихся лав при резком падении давления и одновременном примешивании к ней разнообразного вулканического материала. Количественное соотношение лавы и твердого обломочного материала в ней варьирует в широких пределах с образованием многочисленных разновидностей, различных по составу, строению, окраске и физико-механическим свойствам. Как и вулканические туфы, они обладают большой пористостью и стекловатой структурой. Представителем этих пород может служить арктический туф — декоративный и стеновой материал розово-фиолетового цвета со средней плотностью 750—1400 кг/м³ и плотностью около 2,6 г/см³, пористостью от 45 до 70% и теплопроводностью 0,55—0,62 Вт/(м·К).

Вулканические туфы и лавы отличаются стойкостью к выветриванию, малой теплопроводностью, хорошей морозостойкостью; легко обрабатываются, но не полируются. Прочность их составляет 5–20 МПа, а более плотных — до 50 МПа. Употребляются в качестве стенового материала, бутового камня. Отходы от их разработки используют как заполнитель в легких бетонах. Месторождение туфовых лав находится в Армении.

Осадочные породы представляют особый интерес для строителей, так как служат основаниями и средой для различных сооружений и повсеместно доступны в качестве строительных материалов. Они имеют вторичное происхождение, поскольку исходным материалом для их формирования являются продукты разрушения ранее существовавших пород. Процесс образования осадочных пород протекает по схеме: физическое и химическое выветривание пород, механический и химический перенос, отложение и накопление продуктов их разрушения и, наконец, уплотнение и цементация рыхлого осадка с превращением его в породу. Все осадочные породы имеют одинаковые формы залегания в виде пластов, с которыми связаны их характерные текстурные признаки — слоистость и пористость. Последняя особенно важна, так как оказывает большое влияние на физико-механические свойства пород: прочность, среднюю плотность, водопоглощение, морозостойкость, механическую обработку и др.

Осадочные породы отличаются многообразием структур (рис. 8.5) и текстур с широким варьированием формы, размеров частиц и их соотношения у различных представителей. Для них характерно большое разнообразие минеральных компонентов, более простых по химическому составу, и являющихся преимущественно осадочными новообразованиями, совпадающими по составу с некоторыми магматическими минералами. Среди породообразующих минералов встречаются осажденные из водных растворов карбонаты, сульфаты, водный кремнезем; вторичные (глинистые) продукты выветривания материнских пород — каолинит, монтмориллонит; слюдистые минералы, гидроксиды Al и

Fe; реликтовые минералы, сохранившиеся без изменения, — магматический кварц, полевые шпаты, а также обломки пород различного генезиса и остатки организмов. Некоторые представители осадочных пород растворяются в воде, например каменная соль (галит), гипс, известняки.

Породы *обломочного* (механического) *происхождения* являются продуктами механического разрушения каких-либо материнских пород и сложены преимущественно обломками устойчивых к выветриванию минералов и пород. Они разделяются по крупности обломков на грубообломочные, среднеобломочные (песчаные), мелкообломочные (пылеватые) и тонкообломочные (глинистые). Среди них только глинистые породы являются продуктами химического разложения материнских пород, остальные же породы сложены обломками, не подвергшимися существенному выветриванию. Независимо от размеров частиц обломочные породы могут быть рыхлыми или сцементированными.

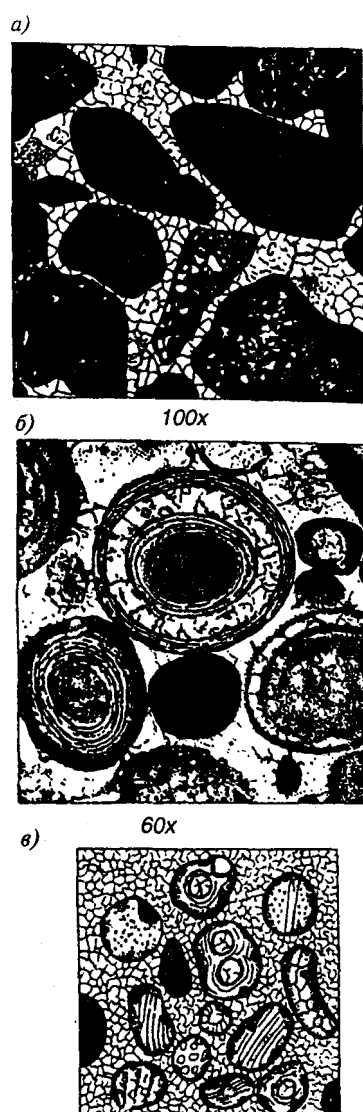


Рис. 8.5. Структуры осадочных пород: а — зернистая (песчаник); б — болитовая (известняк химического образования); в — ракушечная (известняк биогенный); в песчанике цемент кальцитовый (с)

К рыхлым грубообломочным породам относятся разновидности с окатанной и угловатой формой, образовавшиеся в результате накопления крупных обломков. Среди них выделяют обломки размером 1000—100 мм, называемые валунами (окатанные) или глыбами (угловатые); 100—10 мм — галькой (окатанные) или щебнем (угловатые); 10—1 мм — гравием (окатанные) или дресвой (угловатые).

Валуны (валунный камень) состоят из грубоокатанных обломков, обработанных и перенесенных водой или ледником. По генезису валунный камень может быть ледниковым, речным, морским озерным. Более мелкие его разновидности размером 120—300 мм называют булыжным камнем. Крупный валунный камень поступающий на строительство, нуждается в предварительной переработке на штучный материал — шашку, бутовый камень и др.

Галька и гравий образуются аналогично, при переносе обломков на большие расстояния реками, горными потоками, а также под действием морского прибоя, приобретая при этом различную степень окатанности и сортировки. Качество гравия обуславливается его генезисом, минеральным составом, содержанием глинистых и органических примесей и пр. Лучшей разновидностью гравия считается ледниковый, который менее окатан. Гравий применяют в железобетонных сооружениях, дорожном строительстве и как фильтрующий материал.

Глыбы, щебень и дресва представляют собой скопления угловатых обломков скальных пород, разнородных по минеральному составу. Эти отложения особенно характерны для пустынных и полярных районов с интенсивно протекающими процессами физического выветривания. Они достаточно широко распространены в средней и северной полосе европейской части нашей страны.

Песчаные (среднеобломочные) породы представляют собой рыхлую смесь зерен с размерами от 1 до 0,1 мм. Их принято разделять по крупности зерен на крупнозернистые с диаметром частиц от 1 до 0,5 мм; среднезернистые — 0,3—0,5 мм; мелкозернистые — от 0,25 до 0,1 мм. Пески состоят преимущественно из кварца, наиболее устойчивого к химическому выветриванию минерала. Чистые кварцевые пески светлой окраски являются мономинеральными породами. Смешанные (полимиктовые) пески состоят из смеси минералов, в которых кроме кварца находятся полевые шпаты, слюды, амфиболы и др. Среди них наибольшее распространение имеют аркозовые пески красного или серого цвета, преимущественно кислого полевошпатового состава, с небольшой примесью кварца и других минералов. Наибольшей чистотой и однородностью зерен отличаются морские и золотые отложения; морские и речные пески имеют окатанную, а ледниковые — угловатую, наиболее благоприятную для строительных целей форму зерен. Вредной примесью к пескам являются глинистые и пылеватые фракции (0,05—0,005 мм). При оценке качества песка как строительного материала учитывают его минеральный и гранулометрический составы, форму зерен, пористость, коэффициент фильтрации и др. Плотность песков составляет 2,64 г/см³, а средняя плотность — 1800 кг/м³. Они служат главным сырьем для получения керамики, динаса, стекол, бетонов и растворов, кирпича; используются для дорожных покрытий, в абразивном производстве. Распространены повсеместно.

Пылеватые (мелкообломочные) породы состоят из частиц размером от 0,1 до 0,01 мм и отличаются от песчаных содержанием более мелких частиц. Представителем этих пород является лесс — светлоокрашенная пористая (46—50%) порода, содержащая кварц, полевые шпаты, до 30% кальцита и до 50% глинистых минералов. Плотность лессов составляет 2,5—2,8 г/см³, а средняя плотность — 1200—1800 кг/м³.

Они отличаются просадочностью, легко размокают в воде. Используются в цементной промышленности как добавка в бетоны, в производстве кирпича, черепицы и др. Распространены в европейской части нашей страны, на юге Украины, в Средней Азии, южной Сибири.

Глинистые (тонкообломочные) породы состоят более чем наполовину из мельчайших (менее 0,01—0,001 мм) чешуеобразных частиц глинистых минералов, среди которых не менее 25% имеют размеры менее 0,001 мм. Глины образуются при выветривании полевошпатовых и некоторых других силикатных пород и состоят преимущественно из глинистых минералов типа каолинита, монтмориллонита и гидрослюд с примесью кварца, слюды, вторичного кальцита, опала и др. Большинство глин — полиминеральные, однако

среди них имеются наиболее ценные мономинеральные: каолиновые и монтмориллонитовые разновидности. Главным фактором при применении глин в строительстве и производстве строительных материалов является их минеральный состав. Полиминеральные глины — сырье для производства кирпично-черепичных изделий, грубой керамики, глинозема, огнеупоров и т. д.

Каолиновые глины сложены в основном каолинитом и сравнительно свободны от примесей оксидов железа. Они представляют собой белые тонкозернистые, жирные на ощупь малопластичные породы, являющиеся продуктами разложения (гидролиза) алюмосиликатов диссоциированной водой, содержащей свободные ионы водорода и растворенную CO_2 . Процесс каолинизации полевых шпатов схематически представляется в следующем виде:



Каолиновые глины относятся к континентальным отложениям и образуются в условиях кислой среды. Они используются в производстве фарфорофаянсовых изделий, цемента, шамота. Месторождения каолиновых глин находятся на Урале, Украине, в Сибири и др. Монтмориллонитовые глины появляются при разложении вулканических пеплов в щелочной среде. Среди них выделяются сильно набухающие в воде натровые глины с преобладанием катиона Na над катионами Ca, Mg и K и неразбухающие кальциевые — с преобладанием Ca над катионами Na и Mg. К первым относятся бентониты и флоридины, породы белой, серовато-белой, розоватой и другой окраски, характерная особенность которых - сильное набухание при увлажнении с увеличением объема примерно в 16 раз и более и высокая адсорбционная способность. Большинство этих глин обладает резко выраженной пластичностью при затворении водой, сохраняя при высыхании приданную им форму, а после обжига образуют камневидные массы. С увеличением в глинах механических примесей пластичность их быстро снижается. Монтмориллонитовые глины являются замечательными адсорбентами, так как обладают высокой поглотительной способностью. Их месторождения имеются в Крыму, Приднестровье, Закарпатье, Средней Азии, Грузии.

Сцементированные обломочные породы образовались путем цементации рыхлых пород разнообразными химическими веществами. Наиболее прочным является кремнеземистый цемент (вторичный кварц, опал, халцедон), менее прочны железистый (лимонит), карбонатный (кальцит) цементы, малой цементирующей способностью отличается глинистый цемент. Ниже приводится описание главных представителей этой группы.

Брекчии — компактные породы, состоящие из угловатых обломков дресвы или щебня, сцементированных каким-либо цементом. Петрографический состав этих обломков отличается однородностью. Угловатая форма обломков обеспечивает хорошее сцепление их с природными цементами, поэтому брекчии, при некоторых видах цементов, имеют достаточно высокую прочность и используются как отделочные камни. Брекчии имеют ограниченное распространение.

Конгломераты — сцементированные природным цементом скопления гальки, гравия, мелких валунов и др., отличающиеся от брекчии пестротой петрографического состава, широким диапазоном прочности (от 5 до 160 МПа) и изменением средней плотности в интервале 1500—2900 кг/м³. По сравнению с брекчиями конгломераты отличаются меньшей прочностью, так как окатанный обломочный материал довольно слабо связывается с цементом. Практическое значение этих пород невелико, однако их характерная структура (вязущее + рыхлый материал) является прототипом самой распространенной структуры ИСК. Слабо сцементированные их разновидности используют для получения балласта, а красивые — как отделочные, декоративные камни. Мощные отложения конгломератов известны в Крыму и Средней Азии.

Песчаники образуются путем цементации зерен песка при просачивании через них разнообразных минеральных растворов. В зависимости от разновидности цемента различают кремнистые, известковые, железистые, гипсовые, глинистые, битуминозные и другие виды песчаников. Их прочность определяется видом природного цемента, характером его сцепления с зернами песка, плотностью породы. Она колеблется в пределах от 1 до 150 МПа и выше, а средняя плотность — от 1900 до 2800 кг/м³. Наиболее прочными (100—150 МПа и более) являются кремнистые песчаники со средней плотностью до 2800 кг/м³. Малой прочностью отличаются глинистые песчаники, легко разрушающиеся при насыщении водой или циклическом замораживании и оттаивании; известковые песчаники неводостойкие. В битуминозных песчаниках битум, пропитывающий толщу пород, составляет до 20% их массы. Окраска песчаников зависит от цемента: кремнистые и известковые имеют белые и светлые тона, железистые — желтые и красноватые и т. д. Их применяют для получения стенового камня, бута, щебня, а также декоративного отделочного материала. Разновидности песчаников, содержащие не менее 97% кремнезема, идут на изготовление кислотоупорных материалов и сырья, для получения огнеупоров, абразивов и др., используются в сооружениях. Широко распространены в Карелии, на Украине, в Поволжье и др.

Породы химического происхождения (хемогенные) образовались в результате выпадения из истинных и коллоидных водных растворов различных веществ. Важное значение имеют слаборастворимые и подвижные соединения карбонатов Ca и Mg, а также легкорастворимые сернокислые и галоидные соединения — гипсы и ангидриты, осаждающиеся при испарении пересыщенных растворов в замкнутых морских бассейнах или озерах, к которым относятся отложения плотных и оолитовых известняков и известковых туфов, магнезита. Важным структурным признаком этих пород являются форма и размеры зерен с характерным для них появлением оолитов — скорлуповатых зерен округлой или эллипсоидальной формы размером от 1 до 5 мм и сферолитов — кристаллических агрегатов игольчатого строения, а также зернистых структур. Текстуры химических пород аналогичны обломочным. Окраска их разнообразна и зависит от примесей. Ниже приводится описание пород этой группы.

К *карбонатным породам* относятся микрозернистые (афанитовые) известняки, а также мономинеральные породы, сложенные кальцитом, с зернистой или кристаллической структурой, пористой или кавернозной текстурой; в зависимости от текстуры средняя плотность известняков изменяется в пределах 2600—2000 кг/м³, снижаясь до 1000 кг/м³ у сильнопористых и кавернозных разновидностей. Пористость прочно сцементированных известняков не превышает десятых долей процента, а у слабосцементированных — достигает 15—20% и выше. Окраска их разнообразна: белая, серая, желтоватая — до черной в зависимости от примесей. Месторождения хемогенных известняков известны в европейской части нашей страны, в Крыму, на Кавказе и др. Используют их в строительстве.

Оолитовые известняки сложены оолитами кальцита, равномерно погруженными в цементирующую массу углекислого кальция или, реже, глины и плотно соприкасающимися между собой. Они — пористые, малоустойчивые к выветриванию и недостаточно морозостойкие породы. Прочность наиболее плотных их разновидностей мала и составляет всего 16—20 МПа. Применяют их для изготовления воздушной и гидравлической извести, цемента и др. Широко распространены в Крыму, Молдавии, на Урале, Кавказе и др.

Известковые туфы — высокопористые, ноздреватые породы, сложенные кальцитом, выпадающим из холодных и горячих углекислых источников при выходе их на поверхность земли. Они отличаются легкостью, небольшой средней плотностью (до 1650 кг/м³) и малой прочностью, обычно около 10 МПа, хотя у плотных разновидностей (травертине), образовавшихся из горячих источников, она может достигать 80 МПа. Из известковых туфов получают известь, применяют их в производстве цемента, а также в

качестве стенового, декоративного материала (травертино) и в строительстве. Их месторождения известны в районе Санкт-Петербурга, Крыму, на Кавказе (Пятигорск). Магnezиты — светлоокрашенные породы, состоящие из минерала магнезита. Прочность и плотность их выше, чем у известняков, но в природе они встречаются реже. Магнезиты являются сырьем для производства огнеупорных изделий, а скрытокристаллические разновидности — плотностью $2,9\text{—}3,0\text{ г/см}^3$ — для изготовления минеральных вяжущих (каустического магнезита) и изделий на их основе. Наша страна богата крупными месторождениями высококачественного магнезита, главные из которых находятся на Южном Урале, Дальнем Востоке и др.

Сульфатные породы. Главными представителями их являются гипс и ангидрит — мономинеральные породы зернисто-кристаллической структуры, сложенные минералами одноименного названия с возможными небольшими примесями глины, песка, органических веществ и др. Гипсы имеют светлую (белую, желтую, серую до темной) окраску, в зависимости от примесей характеризуются пределом прочности при сжатии около 80 МПа и средней плотностью 2200 кг/м^3 .

Ангидриты — более плотные породы с пределом прочности при сжатии 60—80 МПа и средней плотностью от 2800 до 2900 кг/м^3 . Гипс и ангидрит служат сырьем для производства вяжущих, а на их основе — гипсобетонных изделий; применяются как стеновой материал, а также для внутренней отделки зданий. Месторождения их известны в европейской части нашей страны на Средней Волге, в Башкирии, на Урале, в Средней Азии, на Украине, в Донбассе, на Кавказе и др.

Породы органогенного происхождения образовались при непосредственном или косвенном участии организмов, способных извлекать из растворов или морских вод необходимые для их жизнедеятельности соединения и концентрировать их в твердых частях тела. Для этих пород характерны цельнораковинные (биоморфные) и органогенно-детритовые структуры, состоящие из обломков раковин. Из этой группы рассматриваются породы кремнистого (силициты) и карбонатного составов.

Кремнистые породы сложены опалом, минералами группы халцедона и осадочным кварцем. Они образуются в холодных морях, реже в озерных водоемах при непосредственном участии диатомовых водорослей, радиолярий, губок и других организмов, концентрирующих в своих скелетах опал. Среди них выделяют пластовые породы и конкреционные, сложенные кремнистыми желваками (конкрециями), которые встречаются реже первых и часто рассеяны в других породах — известняках, глинах. Главными представителями пластовых пород являются диатомиты, трепелы, опоки и яшмы, образующие отложения большой мощности.

Диатомиты — белые или желтоватые рыхлые породы, состоящие из мельчайших слабосцементированных кремнистых скорлупок — диатомей. Макроскопически они похожи на мел, от которого отличаются отсутствием реакции вскипания с HCl и повышенной гидрофильностью. Диатомиты легкие (средняя плотность $400\text{—}950\text{ кг/м}^3$), не тонущие в воде с высокой (до 90—92%) пористостью породы.

Трепелы — светлоокрашенные рыхлые, легкие и пористые опаловые породы, внешне неотличимые от диатомитов, одинакового с ними химического и минерального состава и несколько большей средней плотностью ($500\text{—}1300\text{ кг/м}^3$). По физико-химическим свойствам они близки между собой: высокопористы, огнеупорны и кислотоупорны, плохо проводят звук и теплоту, отличаются большим водопоглощением, используются как адсорбенты, изоляционные, фильтрующие, шлифующие строительные материалы. Крупные месторождения диатомитов и трепелов имеются в европейской части нашей страны, Поволжье, а также в Грузии, на Украине.

Опоки представляют собой сцементированные кремнистым веществом трепелы или диатомиты. Состоят они из опалового кремнезема, количество которого варьируется за счет непостоянного содержания в их составе примесной глины. Опоки — крепкие и очень легкие, сильнопористые породы палевого, светло-желтого, серого всех оттенков до

черного цвета. Некоторые их разновидности внешне сходны с трепелами и диатомитами (мягкие опоки), другие же являются камнеподобными, твердыми и плотными породами. Средняя плотность опок колеблется от 1200 до 1500 кг/м³ и находится в соответствии с их высокой пористостью (до 30—40%). Они имеют низкий предел прочности при сжатии — до 1—3 МПа, и, как правило, не морозостойкие. Применяются в качестве стенового материала, заполнителей в легких бетонах, дорожного материала, сырья для получения белых вяжущих веществ и различных добавок. Крупные месторождения опок находятся в районах Средней и Нижней Волги, на Урале.

Яшмы сложены микрозернистым (скрытокристаллическим) халцедоном SiO₂ и отличаются полосчатой темно-красной, желтовато-зеленоватой или черной окраской. Являются очень твердыми, крепкими, однородными тонкозернистыми породами и используются в качестве прочного декоративного и поделочного материала. Они широко распространены на Урале, Тянь-Шане и других древних складчатых областях.

Кремни (конкреционные силициты) встречаются в разнообразных вмещающих породах в виде пластов, линз, желваков и состоят из опала и халцедона, иногда с примесью кварца. Наиболее распространены однородные, очень твердые микрозернистые, часто полосчатые, серого, красноватого, черного цвета кремни. Они используются исключительно как абразивный материал.

Карбонатные породы органического генезиса сложены преимущественно кальцитом с примесями кремнезема, глинистых и песчаных частиц, оксидов железа и др. Широко распространены органогенные известняки, образованные путем накопления продуктов жизнедеятельности растительных и животных организмов на дне мелководных теплых морей: ракушечники, коралловые известняки, мел. Органогенные известняки залегают пластами значительной мощности в несколько десятков метров. Главными их структурами являются цельнораковинная (биоморфная), органогенно-детритовая, образованная угловатыми обломками раковин, вторичная, появившаяся при изменении зерен вторичными процессами, а также смешанная. По текстурному признаку выделяются плотные, мелко- и крупнопористые, а также кавернозные разновидности. В связи с различной пористостью средняя плотность известняков колеблется от 1200 до 3100 кг/см³. Значительные изменения физико-механических свойств вызываются не только их пористостью, но и содержанием глинистых примесей: предел прочности при сжатии колеблется от 10 до 200 МПа, водо- и морозоустойчивость также сильно снижаются. При содержании глины до 2% известняки считаются чистыми. Их применяют в строительстве и промышленности строительных материалов как бутовый камень, щебень, стеновые блоки, сырье для получения вяжущих веществ, огнеупоров и т. д. Распространены органогенные известняки повсеместно: мощные отложения их известны в Сибири, на Урале, в Средней Азии, Ленинградской области, а также в Приднестровье, Крыму, на северо-западе европейской части нашей страны, на Кавказе. Разновидностями органогенных известняков являются ракушечники, мел. Ракушечники — пористые породы со средней плотностью 1000—1700 кг/м³, невысокой прочностью (от 10 до 60 МПа) и большим (до 30%) водопоглощением. Мел — микрозернистая, слабосцементированная мягкая порода, сложенная мельчайшими частицами скелетов карбонатных водорослей и одноклеточных животных — фораминифер. Вследствие малой прочности мел очень выгодно использовать в цементной промышленности, для получения чистой белой извести, в производстве стекла, углекислоты, как активный наполнитель пластмасс, резиновых изделий и т. д. Месторождения мела имеются в Среднем Поволжье, Курской, Воронежской, Белгородской областях, на Украине и др.

Среди осадочных пород органогенного происхождения значительное место занимают каустобиолиты — горючие полезные ископаемые: каменный уголь, жидкая нефть, горючие газы, торф и др. Все они являются продуктами жизнедеятельности организмов (главным образом растений), создающих совершенно новое вещество из газов атмосферы и воды за счет энергии Солнца (фотосинтеза, см. 7.2). Для образования этого нового

вещества служат либо органическое вещество растений — древесины, корней, листьев, плодов, клеточной ткани, споры, кожицы (кутикулы) высших растений и их смолистых выделений, либо продукты их разрушения, либо органическое вещество простейших животных. Изменение таких органических веществ с превращением в ископаемую горючую породу происходит в условиях свободного доступа кислорода, вследствие чего протекают не только процессы окисления (горения), но и переход этого органического вещества в газ (истлевание). В условиях когда отсутствует свободный доступ кислорода и не имеется, следовательно, горения, например процессы протекают под толстым слоем застойной воды, органическое вещество (водоросли, мелкие животные) накапливается и медленно разлагается или гниет. Происходит восстановление и обогащение водородом с переходом вещества в битум или сапропель (гнилой ил), а в последующий период времени — формирование углей, горючих сланцев и нефти. Из ископаемых сапропелитов наиболее распространены горючие сланцы — темные, тонкослоистые плиточные породы, легко загорающиеся, с резким запахом жженной резины. Они состоят из 50—60% и более горючего вещества (остатков водорослей и однородной разложившейся массы). Остальная часть горючих сланцев — неорганическая, преимущественно кремнеземистая или карбонатная. В отличие от других пород, именуемых сланцами (глинистыми, слюдястыми и др.) и относящихся к горным породам метаморфического происхождения, горючие сланцы не являются следствием метаморфизма пород и, как отмечалось выше, имеют тонкослоистую и плиточную текстуры, т. е. название «сланцы» условное, по некоторому отдаленному сходству с ними.

Горючие сланцы не используют как топливо вследствие большой их зольности. Они подвергаются перегонке на газ с получением побочного продукта в виде сланцевого дегтя, используемого в строительстве.

Органические остатки (в основном растения) в болотах или в других непроточных водоемах (озерах) постепенно превращаются в торф, что является первой стадией углеобразования; торф в дальнейшем переходит в бурый, а затем и в каменный уголь. Содержание свободного углерода постепенно увеличивается с уменьшением количества других элементов (кислорода, водорода, азота и др.). Наиболее богат углеродом антрацит. Богатейшие залежи бурых и каменных углей встречаются среди толщ осадочных пород всех геологических систем, начиная с девонской. Для строительных целей используются побочные продукты -дегти и смолы при коксовании и газификации каменных и бурых углей.

К группе осадочных пород относятся также некоторые горные породы, пропитываемые в природных условиях битумом или нефтью, именуемые как асфальтовые или битумные породы — известняки, песчаники, мергали и др. Они служат для получения природного битума и порошкообразного материала (асфальтового порошка).

Смешанные породы представляют собой смеси карбонатных и глинистых пород, к которым относятся доломиты и мергели. Доломитами называют породы, состоящие преимущественно из минерала, одноименного с породой, т. е. доломита, в котором содержится до 46% магнезита. Макроскопически они похожи на известняки и опознаются по реакции «вскипания» с HCl (но только подогретой). Окрашены в белый, серый, желтый цвета. При выветривании доломиты покрываются рыхлым желтовато-серым налетом (доломитовой мукой). В природе имеются залежи и доломитовой муки, например, на Верхней Волге, во Владимирской области. Для доломитов характерны сахаровидные, зернистые, плотные структуры и разнообразные, от плотной до пористой (кавернозной) и, часто, трещиноватые текстуры. Камневидные доломиты характеризуются средней плотностью от 2700 до 2900 кг/м³ и пределом прочности при сжатии 60—150 МПа, которые изменяются в более узких пределах, чем у известняков. Они более твердые и плотные породы, но при нагревании диссоциируют раньше известняков. Доломиты применяют наравне с известняками как строительный камень (плиты, бут, щебень) и сырье для производства вяжущих веществ (каустический доломит, доломитовая известь),

а также при получении огнеупоров и теплоизоляционных материалов, стекла и т. п. Месторождения доломитов известны в Московской области, Поволжье, на Урале, Северном Кавказе, в Крыму и др.

Мергели содержат от 25 до 75% CaCO_3 и являются переходными между карбонатными и глинистыми породами. При содержании 25—50% глины в составе известняков образуются собственно мергели, которые с повышением содержания глины до 50—75% переходят в глинистые мергели, а при последующем ее увеличении превращаются в известковистые глины. В составе мергелей вместо кальцита могут находиться доломит и кремнезем, образуя, соответственно доломитовые и кремнеземистые мергели. Мергели — тонкозернистые, однородные по структуре, желтые, серые, темно-серые, неустойчивые к химическому выветриванию породы с физико-химическими свойствами, зависящими от содержания глины. Средняя плотность их составляет 1900—2500 кг/м³, а предел прочности при сжатии — 60 МПа. Они быстро диагностируются с помощью HCl — бурно вскипают с образованием на поверхности породы грязного пятна, чего не наблюдается при аналогичной реакции у известняков. Мергели являются лучшим сырьем для производства цементов, и на их базе работают крупнейшие комбинаты (Новороссийск, Амвросиевка и др.). Их месторождения широко распространены в пределах Русской равнины, на Украине. Особенно ценными являются мергели черноморского побережья Кавказа, залегающие мощными пластами между Новороссийском и Геленджиком.

Аллитовые (алюминиевые) породы состоят преимущественно из гидроксидов Al , часто с большим содержанием оксидов Fe . К ним относятся бокситы, состоящие в основном из гидроксидов алюминия с примесью опала, глинистых минералов. Чистые разновидности бокситов содержат до 65—75% глинозема и до 25—35% воды. Окраска их может быть белой, охристо-желтой, бурой в зависимости от содержания оксидов железа. В структурно-текстурном отношении они могут быть микрозернистыми твердыми или рыхлыми разновидностями, похожими на глину. Бокситы используют для получения глиноземистых цементов, огнеупорных материалов, адсорбентов и др. Крупные месторождения их имеются на Урале, в Ленинградской области.

Метаморфические (вторичные) породы образовались под воздействием высоких температуры и давления, химически активных газообразных веществ и горячих растворов, циркулирующих в породах. Воздействию этих факторов, особенно проявляющихся при тектонических процессах, подвергаются как магматические, осадочные, так и ранее метаморфизованные породы. Результат такого воздействия — изменение структурных и текстурных свойств, а иногда и химического состава пород. Минеральный состав метаморфических пород сходен с составом материнских пород, но наряду с первичными минералами: кварцем, полевыми шпатами, амфиболами, слюдами — появляются вторичные, характерные только для метаморфических пород: гранаты, хлориты, серпентин и др. Они имеют кристаллически-зернистую (кристаллобластовую) структуру с вытянутой формой частиц и разнообразные виды текстур. Наиболее типичными текстурами являются сланцеватая с параллельным расслоением в одном направлении чешуйчатых, листоватых, пластинчатых минералов; полосатая (гнейсовая) с линейным расположением чередующихся полос различного минерального состава, а также массивная текстура, развивающаяся при перекристаллизации однородных первичных пород без изменения расположения их зерен (рис. 8.6) Формы залегания метаморфических пород соответствуют формам залегания материнских магматических и осадочных пород. К наиболее распространенным метаморфическим породам относятся гнейсы, кристаллические сланцы, кварциты и мраморы.

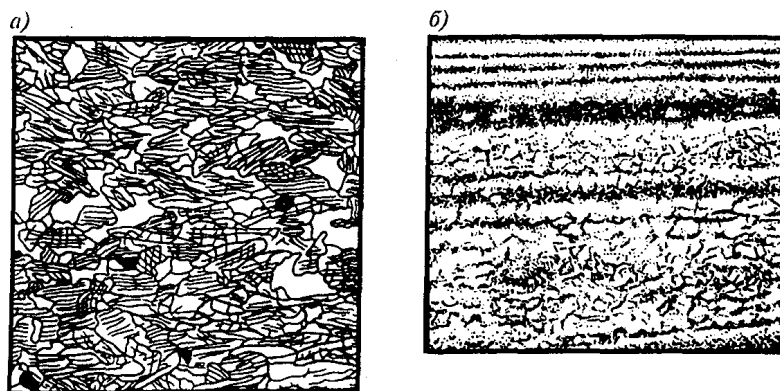


Рис. 8.6. Структура и текстура метаморфических пород: *а* — гранобластовая структура (гнейс); *б* — слоистая текстура (гнейс)

Гнейсы — светлоокрашенные серые, красноватые и других оттенков кристаллически-зернистые породы, образующиеся при метаморфизме кислых магматических и осадочных пород. Среди них различают ортогнейсы, появившиеся из гранитных или кислых порфировых, и парагнейсы — результат метаморфизма осадочных пород: аркозовые песчаники, рыхлые скопления кварца, полевого шпата, слюды и др. Ортогнейсы по минеральному составу сходны с гранитами, но отличаются от них слоистой или полосатой текстурой, с которой связано появление анизотропии и ухудшение свойств породы. Тонкослоистые гнейсы не отличаются морозостойкостью и сравнительно быстро выветриваются. При этом разрушение происходит еще быстрее, если они содержат пирит. Средняя плотность их составляет $2400\text{—}2800\text{ кг/м}^3$, а наибольший предел прочности при сжатии (перпендикулярно слоистости) изменяется от 100 до 200 МПа и уменьшается в параллельном направлении примерно в 2 раза. Слоистость облегчает добычу и переработку гнейсов, но при этом образуется нежелательная лещадность щебня. Они используются в виде облицовочных плит, для кладки фундаментов, в качестве мостильного и бутового камня и др. Гнейсы являются самыми распространенными метаморфическими породами. Их месторождения известны в Карелии, на Кольском полуострове, в Восточной Сибири, Средней Азии, на Украине, Кавказе и др.

Кристаллические сланцы образуются из магматических или осадочных пород путем метаморфизации. Наиболее сильно изменяются глины, которые уже при слабом влиянии метаморфизма превращаются в глинистые сланцы, а с дальнейшим его усилением претерпевают полную перекристаллизацию и переходят в филлиты — темно-серые и красноватые тонкосланцеватые породы, состоящие из вторичного кварца, серицита и хлорита. Они отличаются способностью раскалываться на ровные тонкие пластинки и, обладая достаточной плотностью, вязкостью, твердостью и водостойкостью, используются как местный кровельный материал. Филлиты имеют предел прочности при сжатии $50\text{—}240\text{ МПа}$, плотность — около $2,7\text{ г/см}^3$ и пористость — $0,3\text{—}3\%$.

При дальнейшем повышении давления и температуры филлиты преобразуются в другие разновидности сланцев: слюдяные, хлоритовые, тальковые и т. д. Особое место занимают шунгитовые сланцы — древние (докембрийские) метаморфизованные осадочные породы плотной структуры, сложенные шунгитовым (аморфным графитовым) веществом. Они окрашены в темно-серый иногда, черный цвета, отличаются средней плотностью $2700\text{—}2900\text{ кг/м}^3$, прочностью при сжатии $140\text{—}300\text{ МПа}$, а при изгибе $35\text{—}55\text{ МПа}$ и водопоглощением до $0,16\text{—}0,38\%$. Особо ценным свойством этих пород является их способность превращаться в легкий пористый заполнитель — шунгитовый гравий. При этом наиболее активное и полное вспучивание при обжиге проявляется у шунгитовых пород, содержащих $1,2\text{—}5\%$ шунгитового вещества с частицами размером около $0,02\text{ мкм}$, равномерно распределенного в кварц-плагиоклазхлоритовой силикатной массе. В последней хлорит может заменяться слюдой или же хлорит и слюда могут присутствовать

одновременно. Особенностью шунгизитового гравия является наличие стекловатой структуры и исключительная инертность по отношению ко всем агрессивным средам.

Шунгитовые сланцы применяют в качестве сырья для получения шунгизитового гравия, черного цемента, красок, добавок при изготовлении силикатного кирпича, штучных плит для полов, плинтусов, а также как декоративный и скульптурный материалы. Шунгитовые сланцы добывают в Карелии. Различные разновидности других кристаллических сланцев встречаются во многих районах Сибири, Урала, Кавказа.

Кварциты образуются путем метаморфизации кварцевых песков и песчаников под влиянием динамотермического метаморфизма с преобладанием высоких температур и превращаются в кварциты — очень плотные и твердые мелко- и среднезернистые (гранобластовые) белые, желтые, серые, красноватые породы с массивной или сланцеватой текстурой. Наряду с кварцем (до 95—99%) они могут содержать различные примеси: слюды, гематит, хлориты и др. Кварциты погодоустойчивые и прочные породы: предел прочности их 100—400 МПа, а средняя плотность 2800—3000 кг/м³. Они отличаются слабым сцеплением с вяжущими, большой хрупкостью и трудно обрабатываются; имеют высокую огнеупорность, кислото- и щелочестойкость и применяются главным образом в производстве динаса, а также как абразивный, кислото- и щелочестойкий материал. Красивые разновидности кварцитов — прекрасный декоративный и облицовочный материал. Разновидности со значительным содержанием (более 40%) железистых минералов служат рудами (Криворожье, Курская магнитная аномалия). Месторождения кварцитов известны в Карелии, Ленинградской области, Криворожье, КМА, на Алтае и др.

Мраморы возникают в природе в результате перекристаллизации известняков и доломитов преимущественно под влиянием динамотермального метаморфизма с преобладанием температурного фактора. Чаще всего они появляются на контакте карбонатных пород с интрузиями и представляют собой равномерно-зернистые массивные или слоистые породы, окрашенные в разнообразные цвета от светлых до черных с различными оттенками в зависимости от содержания примесей. К главным породообразующим минералам относятся кальцит (легко вскипающие от HCl мраморы) и доломит (плохо вскипающие мраморы), с возможными примесями, в том числе кварца. Особенно вреден пирит, легко разлагающийся на воздухе с образованием H₂SO₄ и сильно ухудшающий физико-механические свойства мрамора и его окраску. Средняя плотность мрамора 2600—2800 кг/м³, а предел прочности при сжатии достигает 100—120 МПа. Доломитовый мрамор значительно тверже и прочнее кальцитового. Мраморы хорошо обрабатываются — пилятся, шлифуются и полируются, слабо сопротивляются выветриванию, особенно влиянию агрессивной воды, содержащей растворенную углекислоту. Их применяют для внутренних отделочных работ, а в виде крошки — при приготовлении цветных штукатурок, облицовочного декоративного бетона. Месторождения мрамора находятся в Карелии, на Урале, в Сибири, на Украине, Кавказе.

8.4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

Качество минерального материала определяется степенью дисперсности и кристаллохимическими особенностями (топохимией) поверхности его частиц. Дроблением грубозернистых минеральных материалов обеспечивается получение частиц разных размеров и формы, что позволяет разделять их на фракции. При измельчении мелкозернистых материалов увеличивается удельная поверхность и повышается ее физико-химическая и химическая активность. Последовательное уменьшение размеров частиц в процессе измельчения минералов и горных пород сопровождается быстрым увеличением их суммарной и удельной поверхности (см. рис. 2.2). С увеличением удельной поверхности материалов повышаются ее потенциальные энергии и способность переходить в другую фазу, например путем растворения частиц. При механическом измельчении нарушаются некоторые химические связи с образованием на поверхности частиц групп свободных радикалов и свободных ионов с нескомпенсированными зарядами, например катионов Ca^{2+} и комплексных анионов $(\text{CO}_3)^{2-}$ при нарушении связей между ними в кристаллической решетке кальцита, или же появлением ненасыщенных катионов Ca^{2+} и анионных тетраэдрических групп SO_4^{2-} при дроблении гипса. Образующиеся при этом частицы — обломки кристаллических решеток — становятся сложными пространственными системами, взаимодействующими с внешней средой как сложные электрические поля, знак и величина которых зависят от химического состава вещества, характера строения и размера частиц. Свежеобразованная поверхность минеральных частиц обладает повышенной реакционной способностью, причем она может заряжаться преимущественно положительно, как, например, у кальцита, или отрицательно, как у кварца, или оказаться нейтральной, как у графита.

Путем сухого измельчения минеральных материалов можно получить порошки с различными кристаллохимическими особенностями: а) с высоким потенциалом положительного знака и большим количеством адсорбционных центров в виде катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} на поверхности частиц — из кальцита, доломита, известняка; б) с высоким потенциалом отрицательного знака и значительным количеством адсорбционных центров в виде ионов O^{2-} — из кварца, кремния, каолинита, гранита, трахита, вулканического туфа; в) с пониженным потенциалом отрицательного знака в связи с наличием на поверхности их частиц катионов различной валентности K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} и др. — при измельчении полевого шпата, слюд, роговой обманки, авгита, асбеста, гидрослюды, гипса, габбро, диабазы и др.; г) с преимущественно нейтральной поверхностью частиц — полученные из талька и графита. Частичное нарушение химических связей, вызываемое измельчением материалов, способствует появлению на поверхности частиц химических центров с повышенной активностью, эффективность проявления которой при взаимодействии с реагентами окружающей среды (вода, щелочные и кислотные растворы и др.) определяется характером и составом последней. Обычно создаются благоприятные условия для протекания физико-химических процессов на границе раздела фаз в виде смачивания, адсорбции, растворения и т. п.

Одной из предпосылок обоснованного выбора исходного материала является прогнозирование энергетических свойств его поверхности в высокодисперсном порошкообразном состоянии, в том числе с изменением знака потенциала на границе раздела фаз. Примером сохранения или изменения кристаллохимических особенностей высокодисперсных минеральных материалов может служить использование сухого свежизготовленного порошка хризотил-асбеста в двухкомпонентных битумо-минеральных смесях или же в сложных системах — при производстве асбестоцементных изделий мокрым способом. В первом случае при приготовлении асфальто-вяжущего вещества на основе битума сухой хризотил-асбестовый порошок при соединении с последним сохраняет свой несколько пониженный отрицательный потенциал поверхности частиц, не обеспечивающий достаточно прочного взаимодействия

их с ПАВ (свободными асфальтогеновыми кислотами, асфальтенами) битума на границе раздела фаз, которое несколько компенсируется механическим армированием битумоминеральной смеси тончайшими (до $0,1\mu$ и меньше) эластическими волокнами асбеста.

Последующее контактирование битумно-асбестового вещества с водой, т. е. появление в этой системе новой (водной) фазы, сопровождается резким снижением его структурно-механических свойств. Значительная часть пленочного битума, слабо связанного с поверхностью асбестовых частиц, при этом снова переводится в свободное состояние полярными молекулами воды, которые одновременно гидратируют освободившуюся поверхность асбестовых частиц. Поверхностно-активные вещества битума, потерявшие адсорбционную связь с частицами асбеста, становятся активными гидрофильными центрами в системе, особенно сильно гидратируя и ухудшая ее свойства с повышением дисперсности и количества асбестового порошка. При этом возможно изменение отрицательного знака потенциала поверхности частиц хризотил-асбеста на положительный в результате ее перезарядки. Последняя может быть вызвана преимущественным отщеплением ионов $(OH)^-$ с их поверхности молекулами воды и возникающим на ней вследствие этого избытком положительных ионов Mg^{2+} .

При производстве асбестоцементных изделий мокрым способом хризотил-асбест является составной частью сложной системы асбест — цемент — водный раствор гипса, извести и щелочей. Свойства его поверхности начинают быстро изменяться на границе с водной, щелочной или другими средами, приобретая положительный потенциал, около 100 мВ , за счет перезарядки поверхностного слоя частичек (волоконцев) асбеста, которые состоят из гидроксильных групп $(OH)^-$, соединенных со смежным внутренним слоем из ионов Mg^{2+} . Значительная поверхностная активность этих щелочных групп при их частичном растворении или притяжении ионов противоположного знака обеспечивает появление явно выраженного положительного заряда хризотил-асбеста. С этими явлениями связаны эффективность технологического процесса получения асбестоцементной продукции и ее качество, которые определяются характером реакций, протекающих на поверхности раздела компонентов в системе, и зависят от фильтрующей способности асбестоцементной суспензии, т. е. от поверхностных свойств твердых асбестовых частиц и раствора, в котором они диспергированы. Размеры седиментационного объема при фильтрации асбестоцементной суспензии связаны обратной зависимостью с величиной поверхностных зарядов частиц. При хризотил-асбестовом компоненте с его сравнительно большим зарядом имеет место значительное отталкивание частиц, препятствующее их слипанию, и возникают малые седиментационные объемы с плотной упаковкой твердых частиц, пониженной водопроницаемостью и повышенной тенденцией к самоуплотнению, которые мешают регулировать плотность продукции.

При использовании хризотил-асбеста из верхних горизонтов месторождений его внешний бруситовый слой $Mg(OH)_2$ может оказаться нарушенным вследствие выветривания. Во взаимодействие с жидкой средой вступает тогда более глубокий слой кремнекислородных тетраэдров, что вызывает образование тончайшего слоя кремнекислоты H_2SiO_3 , диссоциирующей с отщеплением преимущественно ионов H^+ . Оставшиеся при этом на поверхности частиц ионы SiO_3^{2-} сообщают им отрицательный заряд, а подвергшийся выветриванию хризотил-асбест по знаку потенциала напоминает амфиболовый асбест. Эта последняя разновидность асбеста характеризуется небольшим отрицательным зарядом и способностью образовывать беспорядочно ориентированные сетчатые асбестоцементные структуры с хорошими фильтрационными свойствами (очень важными при производстве асбестоцемента).

При измельчении минеральных материалов рациональный предел степени дисперсности устанавливают опытным путем. С его превышением энергетическая активность поверхности настолько возрастает, что происходит самопроизвольное агрегирование частиц с появлением комковатости, уменьшением удельной поверхности и однородности.

Возрастает опасность потери поверхностной активности порошкообразного материала в период длительного его хранения, что снижает прочность сцепления частиц с вяжущими веществами. Потребуется ввести в помольную установку ПАВ, чтобы экранировать с их помощью возникающую новую поверхность с повышенной энергетической активностью и, возможно, с иным электростатическим зарядом.

Повышение энергетической активности минеральных природных веществ происходит не только в результате принудительного диспергирования при механическом измельчении минералов и горных пород. Исследования, проведенные на побочных продуктах Курской магнитной аномалии, получаемых при разработке полезных ископаемых с больших глубин карьеров (глубже 500 м), показали их повышенную энергетическую и химическую активность. В природных условиях она возникает за счет коррозии пород, особенно кварцесодержащих, образования метаморфизированных структур под влиянием высоких давлений и температур, возникновения дефектов и существенного снижения структурной упорядоченности кристаллов с полным или частичным разрушением кристаллических решеток породообразующих минералов. Отмечен также синтез новых химических соединений в твердой фазе с участием тонкодисперсного кварца с корродированной поверхностью в толще коры выветривания.

8.5. ЗАКОНОМЕРНОСТИ СВОЙСТВ ПРИРОДНОГО КАМНЯ

Все минералы и горные породы обладают определенными зависимостями их свойств от состава и структуры. Но эти частные зависимости исходят из некоторых обобщенных, когда одна из них оказывается общей для многочисленных разновидностей природного камня. Подобная общая зависимость становится закономерностью и может иметь большое практическое значение при выборе камня для строительных целей.

Выше отмечалось, что по составу породы могут быть моно- и полиминеральными. Качественные характеристики первых определяются свойствами их породообразующего минерала, формой и размером его частиц, дефектами структуры, типом химической связи между частицами, макро- и микропористостью и т. п. Кварцитам, например, передаются свойства их породообразующего компонента кварца: высокие твердость, плотность и механическая прочность; малые деформативность (хрупкость), раковистость излома, высокая стойкость к химическому выветриванию и др. На физико-механических свойствах известняков отражаются характерные особенности породообразующего кальцита: сравнительно легкая растворимость в воде, низкая твердость и совершенная спайность, с которыми связана пониженная прочность этих пород. Такое влияние свойств кальцита отражается также на свойствах мраморов, являющихся метаморфизованными разновидностями известняков. И хотя высокие температура и давление несколько уменьшают влияние кальцита как породообразующего компонента, его физико-химические свойства и кристаллохимические особенности играют определяющую роль в процессе формирования структуры и свойств мраморов. Но особенно отчетливо прослеживается негативное влияние совершенной спайности кальцита на прочность крупнокристаллических разновидностей карбонатных пород химического генезиса. Снижение их прочности при механическом воздействии объясняется прежде всего разрушением частиц кальцита по плоскостям спайности, а также по границам их контакта друг с другом.

В отношении известняков, осадочных мономинеральных пород, отчетливо прослеживается следующая закономерность: у малопористых их разновидностей значения показателей прочности, плотности, упругости и некоторых других свойств приближаются к величинам показателей тех же свойств их породообразующего минерала кальцита. Эта же закономерность справедлива для кварцитов и мраморов — пород метаморфического генезиса, несмотря на то, что в условиях метаморфизации могут нарушаться структура и свойства не только исходной породы, но и ее породообразующего минерала (принцип Ле-Шателье), даже при неизменном химическом составе, т. е. в случае изохимической перекристаллизации.

С увеличением пористости, а также с появлением неплотностей в контактах и некоторых других структурных дефектов, неизбежно возникающих при формировании мономинеральных пород, их упругие и прочностные свойства интенсивно снижаются.

Аналогичные явления происходят в полиминеральных породах, когда преобладающий количественно породообразующий минерал оказывает наиболее заметное влияние на формирование определенных свойств породы. У магматических пород, например гранитов, с увеличением содержания кварца, имеющего очень высокий предел прочности при сжатии (около 2000 МПа), повышается механическая прочность. Наоборот, увеличение количества полевых шпатов и слюды в этих породах снижает их прочность, обычно составляющую до 200 МПа для мелкозернистых и до 120—140 МПа для крупнозернистых их разновидностей. Это происходит вследствие того, что полевой шпат не отличается высоким пределом прочности при сжатии, аналогично кварцу (всего около 170 МПа), а слюда с присущей ей высокой спайностью и способностью образовывать плоскости скольжения способствует механическому разрушению гранита с появлением внутренних скалывающих напряжений. При небольшом количестве слюды или полной ее замене роговой обманкой гранит приобретает повышенные вязкость и прочность (в том

числе и на ударную нагрузку). С повышением пористости у выветрелых и одресвелых гранитов их прочность быстро снижается, достигая 80—60 МПа и ниже. Аналогичное влияние увеличения пористости обнаруживается на показателях модуля упругости: при возрастании пористости в 5 раз, т. е. с 0,6 до 3,0%, значение этого показателя у крупнозернистого гранита понижается с $6,0 \cdot 10^4$ до $1,6 \cdot 10^4$ МПа и вместе с тем в связи с необратимым расшатыванием его структуры одновременно отмечается повышение остаточной деформации.

Многие осадочные породы также являются полиминеральными агрегатами, часто состоящими из неодинаковых по размеру обломков минералов и горных пород. Свойства этих сложных пород (брекчий, конгломератов и др.) обуславливаются как свойствами самих обломков, так и особенно свойствами природного вяжущего вещества, выполняющего роль матричного компонента моно- или полиминерального состава. Природные цементы могут быть аморфными или кристаллическими. Наиболее прочные — кварцевый, кремнистый и опаловый мономинеральные равномерно-зернистые цементы. Значительно уступают им по прочности разнотельные полимиктовые цементы, состоящие из минеральных зерен различного химического состава с неодинаковыми размерами частиц. Наименьшей цементирующей способностью отличаются глинистые и растворимые соединения (глины, гипсы и др.). Эту группу пород можно по аналогии сравнивать с искусственными строительными конгломератами (например, с бетонами), формирование структуры которых происходит под влиянием вяжущих веществ в заводских условиях.

Выше отмечалось, что на прочность и другие качественные показатели горных пород существенное влияние оказывает пористость. В породах она может быть очень грубой (туфы), крупной (ракушечники), мелкой и тончайшей, незаметной даже под микроскопом (диатомиты). В породах различают первичную пористость, обычно закрытую, и тонкодисперсную, зависящую от характера упаковки, формы и размера частиц, их взаимного расположения, величины того первоначального давления, которое испытывали породы в процессе формирования структуры. Пористость может быть также вторичной и чаще всего открытой, возникшей на более поздних стадиях отвердевания породы или осадка, при растворении или замещении в них отдельных минералов, особенно в результате последующего выветривания. Вторичные поры всегда имеют более устойчивые и сохранившиеся размеры, так как, возникая в уже затвердевшей массе, они в меньшей степени подвержены последующему спрессовыванию или заполнению новыми минеральными веществами.

Являясь важным структурным элементом, поры вместе с минеральными частицами непосредственно и активно участвуют в формировании свойств горных пород. Б.П. Беликовым и другими были выполнены исследования упругих характеристик многих горных пород общим импульсным ультразвуковым методом. Изучались как изотропные моно- и полиминеральные, так и анизотропные породы с определением модуля Юнга E , модуля сдвига C , модуля объемного сжатия K , скорости распространения продольной волны v_p и некоторых других параметров упругих свойств. Установлено, что при весьма малой пористости, например меньшей 1%, упругие свойства минералов и пород определяются в основном их минеральным составом. С увеличением же пористости значения упругих и прочностных свойств снижаются в соответствии с эмпирическим уравнением

$$\lg \frac{M}{M_0} = Am_1 - Bm_2, (8.1)$$

где через M и M_0 обозначены любые из упругих свойств (параметров) камня с порами (M) и без пор или с их минимумом (M_0), а через m_1 и m_2 — величины вторичной и первичной пористости.

Общий характер влияния пористости на механические свойства пород и минералов можно выразить наглядно в виде графической зависимости в системе координат «свойства = f (пористость)». График имеет вид сложной экстремальной кривой, состоящей из вершины и двух ниспадающих от нее ветвей (рис. 8.7). Вершина кривой соответствует наибольшим значениям параметров упругости, прочности, плотности минералов и пород, когда их пористость предельно мала (меньше 1%). На ветви, расположенной слева от вершины экстремальной кривой, располагаются показатели свойств, которые снижаются по мере возрастания первичной пористости пород. Это снижение характеризуется сравнительно умеренной интенсивностью, вызываемой наличием закрытых мелких и тончайших по своим размерам пор, особенно у минералов. На абсолютные значения свойств кроме пористости влияют также характер внутренних связей между микро- и макрочастицами минерального вещества, свойства минералов и другие факторы, которые обуславливают, кроме того, сравнительно большой разброс опытных данных, особенно при испытании интрузивных и метаморфических пород.



Рис. 8.7. Схема действия закона створа в горных породах и минералах

Справа от вершины экстремальной кривой размещается ветвь интенсивного спада упругих и прочностных свойств при увеличении вторичной (открытой) пористости с характерными для нее более крупными порами. Разброс опытных данных здесь меньше, чем в области левой ветви, и совсем незначителен на отрезке кривой, близкой к вершине. Аналогичное совпадение показателей свойств при изменении вторичной пористости отмечается и при испытании образцов из эффузивных и осадочных пород.

В мономинеральных породах на максимум величин показателей свойств влияет, как отмечалось, уровень соответствующих значений породообразующего минерала; в полиминеральных — некоторый усредненный их уровень, обусловленный минеральным составом, количественным соотношением и характером связей минералов. А в обоих случаях на величины экстремумов свойств влияют наличие пор и микропор, степень дефектности структуры и др. К экстремумам показателей свойств горные породы и минералы приближаются в результате очень длительных процессов структурообразования с постепенным набором в природных условиях таких параметров, при которых возникает своеобразная оптимальная структура. Закономерное протекание этих процессов в природе может прерываться стихийными, в том числе тектоническими, осложняемыми вулканической деятельностью явлениями, которые могут резко изменять и даже прерывать процесс формирования структур и свойств пород как на ограниченных, так и на огромных участках земной коры. Нарушение закономерного процесса структурообразования возможно также под влиянием изменения климатических, географических условий и других факторов. В одном и том же месторождении могут встречаться представители пород, разнородные по структуре и свойствам, причем только некоторые участки пород в данном месторождении могут оказаться с оптимальной

структурой и комплексом экстремальных значений свойств в вершине кривой. Породы других участков того же месторождения, испытавшие влияние неблагоприятных факторов, отмеченных выше, не приобретают оптимальной структуры и не отличаются высокими показателями свойств (например, прочностных). Несмотря на то, что естественный процесс оптимизации структуры может неоднократно прерываться, он постоянно и последовательно продолжается во времени, поскольку связан в конечном итоге с приближением ее к равновесному состоянию и нарастанию термодинамической устойчивости горных пород.

Зависимость свойств природного камня от состава и оптимальной структуры отражает объективно существующую закономерность, которую при обобщении многочисленных опытных данных можно выразить следующим образом: при определенном наборе структурных параметров формируется оптимальная структура природного камня, при которой имеется комплекс экстремумов механических и некоторых физических свойств, непосредственно связанных со структурой и отражающих ее характер. Действует и обратная связь: комплекс экстремумов свойств горной породы или минерала отражает наличие оптимальной структуры с характерными для нее относительной однородностью, минимальной пористостью, минимумом других микро- и макроструктурных дефектов, с наиболее устойчивым равновесным состоянием внутренних связей, с минимумом внутренней свободной энергии, с мелкозернистой плотной кристалличностью или непрерывной пространственной сеткой (прослойкой) цементирующего вещества, с оптимальным содержанием стеклофазы и наличием других структурных параметров в соответствующем их наборе. Эти закономерности проявляются как в отношении твердых, так и упруговязкопластичных природных образований, к которым относятся глины, суглинки, лессы, мел, гипсы, асфальтовые породы и др. Они служат основой тождественного закона створа, вскрытого в теории ИСК.

Наблюдается также другая закономерная связь между свойствами главного пороодообразующего минерала и свойствами породы со спадом показателей свойств по мере накопления дефектов структуры, которая является также обобщающей основой закона конгруэнции в теории ИСК (см. 3.2). Такая тождественность закономерного изменения свойств под влиянием структурных параметров у природного камня и ИСК возникает при сходных процессах, которые характерны как для природного генетического, так и заводского технологического периодов. В обоих этих случаях, при формировании структур и свойств, прослеживается воздействие законов кристаллизации из растворов и расплавов, закона эвтектики, правила фаз и др. Различие состоит только в том, что в короткие технологические периоды производства ИСК можно направленно регулировать процессы структурообразования; избегая влияния элементов случайности и аномальных отклонений, которые возможны при формировании структур и свойств пород в природных условиях. Именно поэтому более отчетливо выразились закономерности створа, конгруэнции и др., известные в теории ИСК, базирующиеся на логически обобщенном и обширном практическом материале. В природе эти объективные закономерности проявляются наиболее полно и объективно, хотя вскрыть их сложнее, чем у ИСК.

8.6. ДОБЫЧА И ОБРАБОТКА ПРИРОДНОГО КАМНЯ

Добыча природного камня осуществляется в коренных (граниты, песчаники, известняки и др.) или рыхлых (гравий, пески, глины) месторождениях, называемых карьерами. В зависимости от условий залегания, качества и запасов горных пород, географического положения различают: промышленные карьеры с большими запасами качественного природного сырья с годовой производительностью более 100 000 м³ и сроком действия более 10 лет, не связанные со строительными объектами и хорошо оснащенные оборудованием и подъездными путями; притрассовые местного значения карьеры, расположенные в районе строительства объектов со сроком действия менее 10 лет и имеющие более высокую себестоимость продукции по сравнению с промышленными карьерами.

Разработка пород может производиться открытым способом, в карьерах, реже подземным (например, разработка органогенных известняков в штольнях) или подводным, при неглубоком залегании пород от поверхности воды в реке, озере. Для открытой разработки наиболее удобны горизонтально или полого залегающие пласты пород, которые могут находиться выше или ниже дневной поверхности или быть на одном уровне с нею. Экономичной считается разработка выходов пород (обнажении) на склонах с небольшим объемом вскрышных работ, сравнительно легким перемещением добытой породы вниз по склону и отсутствием необходимости отвода атмосферных и грунтовых вод от фронта работ. При разработке пород учитывают также их прочность и трещиноватость, на основании которых определяют способ отделения породы от массива. Например, механическим способом (экскаваторами) разрабатывают осадочные породы, разбитые трещинами на небольшие отдельности; отделение глыб слоистых, трещиноватых, столбчатых пород производится также клиньями, механическими лопатами; слабые мягкие породы (ракушечники, известковые туфы) добывают путем распиловки их толщ камнерезными машинами на блоки определенных размеров и формы. Массивные магматические породы разрабатываются с применением взрывчатых веществ с предварительным пробуриванием скважин (шпуров, бурок) по рядам с последующим заложением в них взрывчатых веществ и тщательной заделкой каждой скважины. Буровзрывным способом можно получать монолиты больших размеров, а также рваный камень (бут) и щебень в массовом количестве.

Используются способы распиливания твердых пород (гранитов, мраморов и др.) с помощью механических дисковых пил, армированных пластинками твердых сплавов или абразивными порошками. Вместо дисковых пил применяют буровые машины с цепными пилами, снабженными алмазными или победитовыми¹ режущими насадками, а для отделения блоков пород от массива применяют машины с канатными пилами, в которых в качестве абразива используют кварцевый песок с водой. Вода при этом способствует образованию в массиве микротрещин по принципу «клина». В последние годы находят применение термогазоструйный аппарат для разработки массивов кварцсодержащих пород типа гранитов в виде блоков и других штучных изделий. Работа аппарата основана на термическом воздействии горячей струи (свыше 2500°С) на породу, которая получается при сгорании керосина в кислороде и выбрасывается из сопла камеры. При такой высокой температуре возникают огромные внутренние напряжения, вызывающие резкие структурные деформации, сопровождаемые механическим раздроблением породы. Природный камень, доставленный из карьеров, подвергается дальнейшей обработке, распиливанию и отделке для получения различных видов поверхности: грубой или сравнительно гладкой, в частности с применением шлифования и полирования. Для обработки используют пневматические инструменты и станки, с помощью которых

¹ Победит — металлокерамический твердый сплав с содержанием до 90% Вольфрама (W) и до 10% кобальта (Co).

получают необходимую фактуру (вид поверхности): бугристую, рифленую, бороздчатую и др. (рис. 8.8).

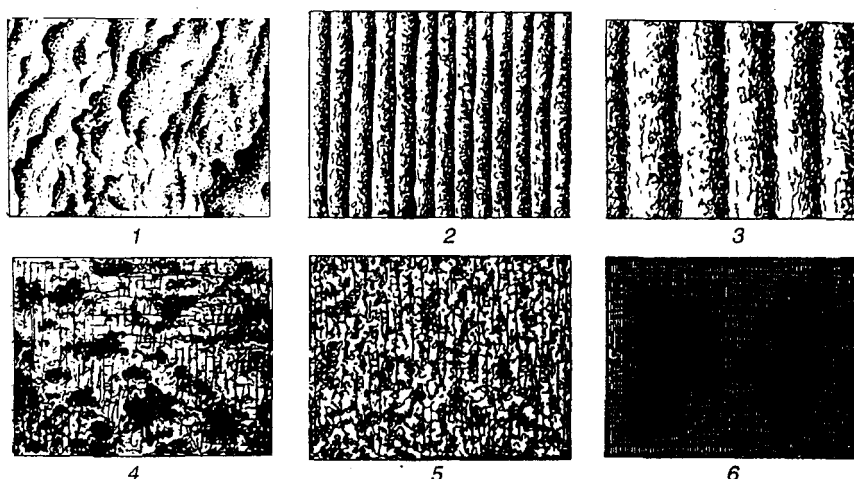


Рис. 8.8. Виды фактуры камня:

1 — скала; 2 — рифленая; 3 — бороздчатая; 4 — бугристая; 5 — точечная; 6 — грубошлифованная

Для получения щебня, каменной крошки, дробленого песка и минерального порошка породы после их добычи из месторождений подвергают дроблению и измельчению в камнедробилках, камнекрошилках с последующими операциями по фракционированию, обогащению, промыванию и пр. Для получения крупно-, средне- и мелкозернистых минеральных материалов используют отходы, получаемые в карьерах или на камнедробильных заводах и установках. Особенно ценными отходами являются побочные продукты при распиловке и разделке природного декоративного камня (мраморов, гранита, кварцита и др.); добавляя цементы, из них вырабатывают крупные блоки, декоративные плиты и пр.

8.7. МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД

С глубокой древности и до наших дней природные каменные строительные материалы широко используют в строительстве. Они относительно доступны и обладают высокими техническими показателями: прочностью, морозостойкостью, долговечностью, хорошими декоративными свойствами.

В зависимости от способа обработки горных пород различают следующие виды каменных материалов и изделий. Выпиливанием или выкалыванием из массива добывают плиты и блоки для каменной кладки, облицовочные плиты, профильные детали и др. Некоторые материалы подвергают обработке скалывающими инструментами, например бортовой камень, другие — грубоколотые — направляют непосредственно на строительные объекты без последующей механической обработки (брусчатка). Крупный рваный камень (бут) получают после взрывания пород в карьере или при шпуровой разделке крупных блоков; при последующем дроблении из него получают щебень, каменную крошку, песок, а при помоле — минеральный порошок. Из природных сортированных залежей добывают окатанный обломочный материал в виде валунов, булыжника, гальки, гравия. Из природного камня без изменения его состава получают также плавленные материалы (каменное литье).

Для каждого конкретного строительства СНиПом рекомендуются определенные виды материалов и изделий из природного камня. Для возведения фундаментов, например, пригоден бутовый камень, пиленные и колотые камни из всех видов пород, а для кладки стен — камни (плиты), блоки из всех разновидностей известняков, доломитов, песчаников, вулканического туфа; для наружной облицовки применяют облицовочные плиты, профильные изделия из гранита, сиенита, диорита, габбро, базальта, кварцита, иногда мрамора и др., а для внутренней отделки — те же изделия, но получаемые из мрамора, мраморовидных известняков, гипсового камня, туфов и др. (рис. 8.9). Природный камень широко используют в дорожном строительстве в виде бортового и мостильного камней, брусчатки, тротуарных плит (рис. 8.10), для защитной облицовки мостовых опор, а также в конструкциях зданий и сооружений. Например, из гранита построен Большой каменный мост через Москва-реку, из известняка — колоннада Большого академического театра, из песчаника — подпорная стенка храма Василия Блаженного, из габбро — Российская государственная библиотека.

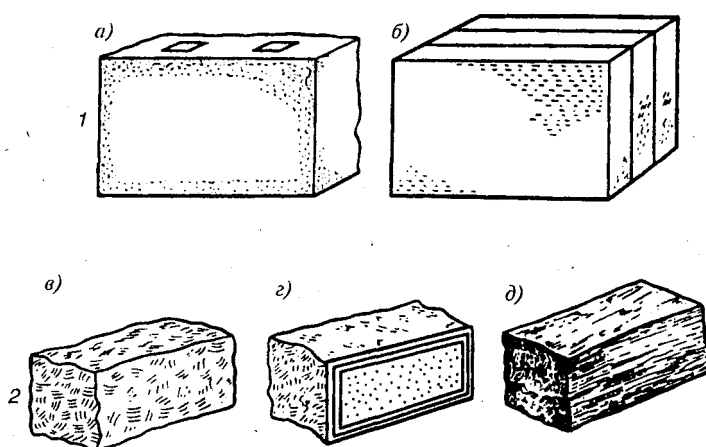


Рис. 8.9. Разновидности штучных изделий из природного камня:

1 — облицовочные плиты; 2 — стеновые блоки; а, б — тесаные, в, г — пиленные, д — колотые

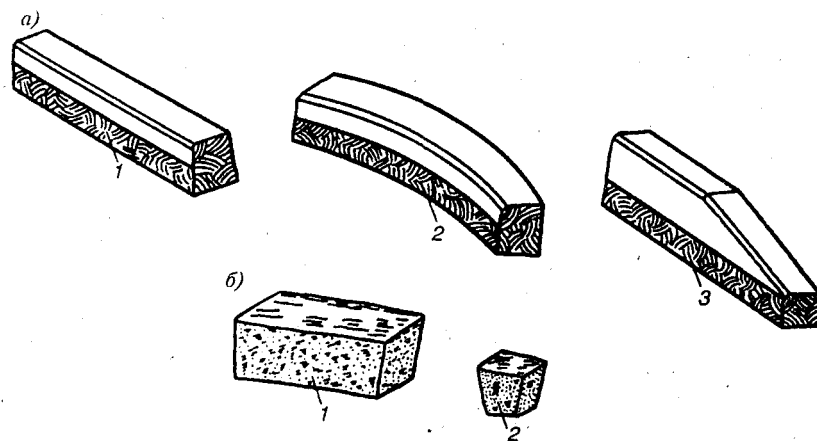


Рис. 8.10. Разновидности применения природного камня в дорожном строительстве:
 а — бортовой камень: прямой (1), лекальный (2), для съездов (3), б — брусчатка: шашка (1), мозаика (2)

Правильный выбор пород для конкретных строительных работ предусматривает их разделение по величинам прочности при сжатии с выделением марок: 4, 7, 10, 15, 25, 35, 50, 75, 100, 125, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 800 и 1000 (соответственно — от 0,4 до 100 МПа). К легким относятся каменные материалы, маркируемые в интервале включительно от 4 до 200, а к тяжелым — от 300 и выше. Такая же маркировка предусмотрена по степени морозостойкости, которая устанавливается числом циклов замораживания и оттаивания: Мрз 10, 15, 25, 35, 50, 100, 200, 300 и 500. По средней плотности выделяют породы тяжелые, со средней плотностью более 1800 кг/м^3 , средние — $1800\text{—}1500 \text{ кг/м}^3$ и легкие — со средней плотностью менее 1500 кг/м^3 . Для возможного снижения прочности при увлажнении пород последние маркируют по коэффициенту размягчения (водостойкости) в пределах 0,6; 0,75; 0,9 и 1.

С учетом вышеуказанных марок уточняют выбор пород, предназначенных для определенных видов строительства. Например, для стеновой кладки подходят только те породы, которые характеризуются марками: по морозостойкости — не менее 15, коэффициенту размягчения — не менее 0,6 и прочности — в зависимости от вида породы; для плотных известняков — в пределах не менее 150, для пористых ракушечников — 25—125 и т. д. Аналогичным образом СНиПом предусматриваются конкретные марки камня для наружной отделки зданий и сооружений, каменных материалов специального назначения (кислото- и щелочестойких, огнеупорных), а также материалов, применяемых в гидротехнических сооружениях и т. п. Материалы и изделия из природного камня отличаются определенными размерами. Для промышленного строительства с применением подъемных кранов для кладки стен используют крупные каменные блоки массой 0,5—1,5 т, длиной 400—3000 мм, шириной 300—500 мм и высотой 800—1000 мм. Крупные стеновые блоки изготавливают размерами 390x190x188; 490x240x188 и 390x190x288 мм. Облицовочные плиты пиленные обычно имеют толщину 12—80 и ширину 200—1000 мм. В настоящее время в связи с переходом на алмазную обработку для облицовки применяют плиты толщиной 10 мм и меньше.

Размеры дорожных штучных изделий из камня изменяются в следующих пределах: бутовый камень в поперечнике достигает 150—500 мм; брусчатка для мостовых делится по высоте на низкую (высотой 100, шириной 120—150 и длиной 150—250 мм); среднюю (высотой 110—130 мм) и высокую (высотой 140—160 мм) и соответственно с аналогичными низкой брусчатке шириной и длиной. Получаемый при дроблении пород щебень является смесью угловатых обломков размером от 5 (иногда от 3) до 70 мм; содержание обломков пластинчатой (лещадок) и игловатой формы допускается в нем не более 15—25% по массе. Вместе со щебнем получают высевки (искусственный дробленый песок) с размерами до 1 мм. Помолом осадочных карбонатных, реже

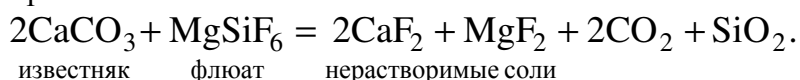
кварцевых, пород изготавливают минеральные порошки с размерами, необходимыми при производстве соответствующих видов ИСК.

8.8. ЗАЩИТА ПРИРОДНОГО КАМНЯ В КОНСТРУКЦИЯХ

Процесс постепенного разрушения каменных материалов в конструкциях зданий и сооружений можно предотвратить или затормозить с помощью различных конструктивных и химических методов защиты, способствующих снижению воздействия увлажнения, нагревания, замерзания, солнечной радиации и т. п.

Конструктивные методы выражаются в устройстве гладких или полированных поверхностей материалов, не способных задерживать дождевые и талые воды и пропускать агрессивные среды внутрь каменного материала.

Химические меры защиты заключаются в флюатировании камня, т. е. обработке его водными растворами солей кремнефтористо-водородной кислоты. Эти соли (флюаты) вступают в химические соединения с растворимыми компонентами камня с образованием фтористых солей Ca и Mg и кремнезема, нерастворимых в воде, которые уплотняют поверхность камня и делают ее недоступной для агрессивных сред. Так, например, при обработке известняковых пород кремнефтористым магнием образуется кремнезем и формируются фтористые соли:



Фтористые соли, образовавшиеся при флюатировании, уплотняют поверхностные слои камня и повышают устойчивость его против выветривания.

Химические меры обработки особенно эффективны для карбонатных пород. Кислые породы перед флюатированием пропитывают раствором известковой соли, которая впоследствии образует с флюатом защитный слой из нерастворимых в воде соединений.

Кроме флюатирования поверхность камня может обрабатываться добавками оксида свинца или железистых соединений, увеличивающих погодоустойчивость поверхности. Для аналогичных целей могут использоваться водные растворы и эмульсии, полимерные вещества и водополимерные дисперсии. Так, например, для получения поверхностного уплотнения камня и гидрофобизации его поверхности и пор применяют кремнийорганические соединения: метилсиликонат натрия ГКЖ-94, этилсиликонат натрия ГКЖ-10 и др., а также водный раствор мочевиноформальдегидной смолы. Известны и другие способы защиты камня от выветривания и разрушения, которые продлевают эксплуатационный срок службы каменных материалов и изделий без заметных выцветов и потускнения поверхности или других следов химического выветривания.

Возникающие аморфные или кристаллические новообразования оказываются практически нерастворимыми в воде. Отлагаясь в порах камня, они уменьшают пористость и смачиваемость его поверхности, скорость капиллярного подсоса воды или грязи. Конструктивные и химические мероприятия, применяемые в совокупности, приводят к увеличению долговечности природного камня в конструкциях зданий и сооружений.

Б. ИСКУССТВЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

В отличие от природных искусственные строительные материалы составляют продукцию заводского производства, получаемую чаще всего с применением химической технологии. Переработке подвергают природное минеральное сырье и разнообразные побочные продукты, в том числе промышленности строительных материалов и изделий. В соответствии с классификацией ИСК (см. рис. 1.1) вырабатывают материалы двух типов: безобжиговые и обжиговые. Из безобжиговых целесообразно отдельно выделять группу силикатных материалов, получаемых с помощью автоклавной технологии.

1. БЕЗОБЖИГОВЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ КОНГЛОМЕРАТЫ

Безобжиговые строительные конгломераты состоят из двух взаимосвязанных структурных элементов — *вяжущего вещества*, выполняющего функции цементирующего матричного компонента, и *заполняющего компонента*. Вяжущее вещество, в свою очередь, состоит из двух химически и физико-химически контактируемых ингредиентов — жидкой, дисперсионной среды (с, %) и твердой высокодисперсной фазы (ф, %). Совместно они образуют в конгломерате гетерогенную дисперсную систему, выполняющую, как уже отмечено, функцию матричного вещества, а количественно выражаемого как (с+ф, %). Остающаяся часть массы до 100 %, т. е. $[100 - (с+ф)]$, приходится на заполняющий компонент конгломерата. Она и по массе, и по объему значительно больше вяжущего вещества. Однако матрица, являясь основой конгломерата, обуславливает его важнейшие свойства и, как правило, его наименование, а именно: ИСК на основе неорганических вяжущих веществ; ИСК на основе органических вяжущих веществ; ИСК на основе полимерных связующих веществ; ИСК на основе комплексных вяжущих веществ. В этой последовательности они и рассматриваются.

Строительные конгломераты на основе неорганических вяжущих веществ

К этой важнейшей для строительства группы ИСК относятся бетоны разной плотности, железобетон, строительный раствор, гипсовые и гипсобетонные изделия, изделия на основе магнезиальных вяжущих веществ, асбестоцементные и силикатные изделия автоклавного твердения. В каждом из них имеется своя матричная часть и свой заполняющий компонент. Но несмотря на своеобразие каждого ИСК на них при оптимальных структурах распространяются общие объективные закономерности.

9.1. ЦЕМЕНТНЫЙ КАМЕНЬ КАК МАТРИЧНАЯ ЧАСТЬ В КОНГЛОМЕРАТАХ И ИСХОДНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

Матричная часть как гетерогенная дисперсная система в безобжиговых конгломератах образуется из жидкой дисперсионной среды, в качестве которой наибольшим применением пользуются вода и некоторые водные растворы, и дисперсной фазы — высокотонкого помола минерального вещества как разновидности неорганических вяжущих материалов.

9.1.1. ВОДА И ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ

Главнейшим ингредиентом безобжиговых ИСК на основе неорганических вяжущих веществ является вода. В начальной стадии технологического процесса при изготовлении конгломератной смеси она выполняет функцию пластифицирующего компонента, но по мере уплотнения и формования смеси и конгломерата с ее активнейшим участием проходит структурообразование. Этот природный минерал (см. 8.2), находясь в жидком состоянии, принимает различный характер связи с вяжущим веществом, использованным в искусственном конгломерате. Подобно тому как вода в земной коре имеет три основных типа связи с другими породообразующими минералами — конституционную, кристаллизационную и адсорбционную, в искусственных конгломератах она также только частично остается в свободном состоянии. В большей мере она внедряется в кристаллические решетки новых формирующихся фаз, входит в новые химические соединения и гелеобразования. В конгломератных смесях и отформованных из них изделиях вода продолжает оставаться активной дисперсионной средой. В ней, как жидкой среде, протекают растворение, диссоциация, коагуляция, пептизация, седиментация и другие физико-химические процессы, характерные для стадий диспергирования и конденсации отвердевающих систем (см. 2.2.5). Вода может входить в межплоскостные емкости и задерживаться в них, что особенно характерно для силикатов со слоистой структурой. Она может проникать в поры и различного рода пустоты, в том числе ультрамикроскопические, удерживаясь более прочно, чем вода адсорбционная. Вода подвержена электролитической диссоциации (точнее, электролитической ионизации) в соответствии с уравнением $2\text{H}_2\text{O} = \text{OH}_3^+ + \text{OH}^-$ и распадом ее молекул на ионы H^{1+} и OH^{1-} с появлением в ней нестойких ионов оксония H_3O^{1+} . В результате непрерывно изменяется активность водной среды по отношению к твердой дисперсной фазе, особенно к минеральному вяжущему веществу. Вода становится раствором электролитов и поэтому ее свойства изменяются пропорционально молекулярной концентрации растворенного вещества. Кроме того, вода реагирует на изменение внешних условий (температуры, давления, магнитных электрических полей и др.), под влиянием которых она изменяет свои первоначальные свойства. Нередко в смеси дополнительно вносятся соли как истинные или потенциальные электролиты, что также благоприятствует повышению активности водного раствора по мере увеличения степени их диссоциации. Вносимая соль (иногда кислота) имеет функциональное назначение — повысить активность к растворению вяжущих веществ и к химической реакции с ними — гидролизу и гидратации с кристаллизацией гидратных новообразований.

Активизация воды с повышением ее энтропии может осуществляться не только введением определенных доз электролитов. Другие методы, подобно солям, могут влиять на структуру воды с внесением в нее новых ионов, образованием дополнительных мономерных молекул за счет разрыва водородных связей и т. п. В частности, к таким методам могут быть отнесены: обработка воды электрическим током строго дозированной величины (из научных работ В.М. Рудакова); магнитная обработка воды; облучение рентгеновскими лучами с образованием свободного гидроксила OH и водородного атома H (не ионов!) по реакции $\text{H}_2\text{O} = \text{H} + \text{OH}$; использование радиоактивных изотопов и др.

Учитывая переменные внутренние и внешние условия, в которых выполняет свои функции вода как компонент конгломератной смеси, можно отметить, что только в самый начальный момент вода в системе остается нейтральной. Затем она становится водным раствором. И тем не менее к воде всегда предъявляются определенные технические требования (ГОСТ 23732-79), которых строго придерживаются в производстве бетонов, строительных растворов и других ИСК.

Вода не должна содержать примеси, препятствующие протеканию химических и физико-химических процессов, в которых она принимает непосредственное участие как активный компонент конгломератной (чаще всего бетонной) смеси. К таким примесям относятся:

органические вещества и среди них — сахар и другие углеводы, фенолы, нефтепродукты, масла, жиры и др.; взвешенные частицы глины, пыли, гумуса и т. п.; растворимые соли кислот, сульфат-ионы, хлор-ионы, другие растворимые вещества. В природной воде допускается не более 5000 мг/л минеральных солей, в том числе сульфатов не более 2700 мг/л (в пересчете на SO_3). Не допускается применять болотную и сточную (бытовую и промышленную) воду без ее предварительной очистки и последующего тщательного контроля, а также морскую воду в целях предотвращения коррозии металла арматуры и образования цементных «бацилл».

Наиболее полно техническим требованиям удовлетворяет вода питьевая (водопроводная) и речная. Однако если река судоходная, то не рекомендуется использовать воду верхних горизонтов. Одним из положительных показателей качества воды служит водородный показатель pH, который, как известно, характеризует концентрацию (активность) ионов гидроксония (для простоты их обычно называют ионами водорода). Он численно равен отрицательному десятичному логарифму концентрации (активности) ионов гидроксония (OH_3^+), выраженной в моль/л, т. е. $\text{pH} = -\lg(\text{OH}_3)$. Водородный показатель pH для воды, используемой в составе бетона, а также для поливки уложенного бетона в сухое время года, должен быть в пределах от 4 до 12,5. Это соответствует воде, дающей слабокислую либо слабощелочную реакции, либо самое лучшее, нейтральную реакцию ($\text{pH} = 7$). Для измерения водородного показателя на практике используют прецизионные инструменты — pH-метры.

9.1.2. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА

Неорганическими вяжущими веществами называются порошкообразные минеральные материалы, которые при смешивании с водой или водными растворами некоторых солей образуют пластическую массу (тесто), способную со временем твердеть до камневидного состояния. Большую группу неорганических вяжущих веществ составляют воздушные и гидравлические.

Воздушные вяжущие вещества способны в тестообразном состоянии твердеть и длительно сохранять свою прочность только на воздухе, вне контакта с водой. Их используют в условиях, не подвергающихся воздействию водной среды. К таким вяжущим веществам относятся: строительная воздушная известь, гашеная (пушонка) и молотая негашеная (кипелка) известь, гипсовые и магнезиальные вещества, а также растворимое или жидкое стекло, которое, как исключение из общего числа вяжущих, не относится к порошкообразным материалам.

Гидравлические вяжущие вещества способны в тестообразном состоянии твердеть и длительное время сохранять прочность не только на воздухе, но и в воде, увеличивая с течением времени прочность отвердевшего теста (камня). Поэтому, в отличие от воздушных, они могут применяться в наземных, подземных, гидротехнических и других сооружениях, подверженных воздействию водной среды. К таким вяжущим относятся портландцемент, глиноземистый цемент, пуццолановые и шлаковые смешанные цементы, ряд специальных цементов, а также гидравлическая известь. К ним примыкают еще и вяжущие вещества автоклавного твердения.

Производство неорганических вяжущих веществ основано на химической переработке сырья. Основной сырьевой базой служат горные породы и сходные с ними по составу побочные продукты промышленности. Из горных пород используют: карбонатные известняк, мел, известковые туфы, ракушечник, мрамор, доломиты, доломитизированные известняки, магнезит; сульфатные — гипс и ангидрит; мергелистые — известняковые мергели; алюмосиликатные — нефелин, глины, глинистые сланцы; высокоглиноземистое сырье — бокситы, корунды и др.; кремнеземистые — вулканический пепел (пуццолан), трассы, диатомит, трепел, опоку, кварцевый песок. Из побочных продуктов в качестве сырья применяют в цементной промышленности шлаки металлургические, особенно первичных процессов доменного производства, а также передельных процессов (мартеновские); шлаки цветной металлургии, топливные и др.; золы, обычно кислые. При использовании побочных продуктов учитывают их химический состав, так как по составу они подразделяются на основные и кислые. У основных шлаков модуль основности $M_0 > 1$, у кислых — $M_0 < 1$:

$$M_0 = \frac{\%CaO + MgO}{\%SiO_2 + Al_2O_3}, \quad (9.1)$$

где в числителе — суммарное количество (в процентах по массе) основных оксидов; в знаменателе — то же, но в отношении кислых оксидов (иногда сюда же прибавляют еще оксид железа Fe_2O_3). Необходимые количественные данные получают путем выполнения химического анализа сырья.

Побочные (попутные) продукты оцениваются также по модулю активности:

$$M_{акт} = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}. \text{ Однако исследования и практика показали на отсутствие}$$

закономерности между величинами указанных двух модулей и реальными свойствами материалов [12]. Поэтому изыскивались иные модули — Тетмайера, Ле-Шателье, Кюля, Юнга, Кинда и др. Исследования показали несомненную полезность коэффициента основности, предложенного П.И. Боженовым и приведенного выше. По мере роста $M_0 > 1$ вяжущие свойства металлургических шлаков заметно повышались.

Сырье бывает одно- и многокомпонентным. При многокомпонентном сырье более однородной смесь получается при увеличении степени дисперсности ее компонентов раздельным или одновременным доизмельчением; при этом возрастает и общая (химическая и энергетическая) активность продукта домола, тем более, если в доизмельчаемую смесь были дополнительно внесены еще необходимые ингредиенты.

Принципиальная схема технологии изготовления минеральных вяжущих веществ состоит из следующих основных операций: подготовка исходных компонентов сырья; дозирование; придание сырью удобообжигаемого состояния с учетом конструкции печи и других производственных факторов; обжиг; помол продукта обжига — в смеси с добавками или без добавок. Центральное место в технологии занимает обжиг, при котором сырье теряет свободную воду, дегидратируется, термически диссоциирует. Обжиг осуществляется в печах или специальных аппаратах (например, при варке гипса, растворимого стекла). Наиболее распространенными являются вращающиеся печи, особенно при производстве портландцемента, глиноземистого цемента, извести и некоторых других вяжущих материалов.

При определенных термических режимах сырье или сырьевая смесь претерпевает изменения в химическом составе и структуре. При повышенных температурах происходят реакции в твердом состоянии. Атомы или атомные группы в кристаллической решетке нагреваемого вещества начинают колебаться в такой степени, что молекулы получают избыточную энергию (энергию активации). Часть активных молекул может сталкиваться и обмениваться местами с атомами и молекулами другого реагирующего вещества, образуя новые соединения. Эти реакции в твердой фазе за счет энергии активации особенно характерны при получении воздушной и гидравлической извести, а также роман-цемента, так как температура обжига сырья не доводится до уровня спекания с появлением жидкой фазы. Как отмечалось в теоретической части (см. гл. 2), большей реакционной способностью обладают аморфные вещества, например, трепел активнее кварцевого песка при одном и том же их химическом составе. При температурах спекания, когда обжигается сырье для получения портландцементного клинкера, образуется жидкая фаза, которая ускоряет химические реакции между твердыми веществами, начинающиеся значительно раньше этой температуры. Продукт обжига приобретает новое качество, отличное от качества сырья или его компонентов. Оно выражается в появлении вяжущих свойств у продукта обжига после затворения его водой или, реже, водным раствором некоторых солей. Чтобы полнее и быстрее проявилась потенциальная вяжущая способность продукта обжига, необходимо всемерно увеличивать поверхность контакта на границе раздела фаз «твердое — жидкое». Это достигается путем тонкого измельчения (помола) продукта обжига. Чем выше степень дисперсности порошкообразного продукта, больше его удельная поверхность, тем полнее и быстрее, при прочих соответствующих условиях, проявляется потенциальная энергия. Для изменения некоторых качественных характеристик вяжущего вещества нередко при помоле вводят добавки, например гипс в портландцемент, известь в ангидритовый цемент и т. п.

Приготовление вяжущих веществ часто связано с использованием наполнителя — тонкоизмельченных кварцевого песка, известняка, доломита, андезита, диабазы, базальта, некоторых шлаков. В виде активных (гидравлических) минеральных добавок используют либо природные породы — диатомит, трепел, опоку, трасс и другие, либо искусственные — нефелиновый шлам, цемянку, глиеж (горелые породы), золы или шлаки. В минеральные вяжущие вещества нередко вводят поверхностно-активные добавки: гидрофильные — сульфитно-спиртовая барда (ССБ), сульфитно-дрожжевая бражка (СДБ) и гидрофобные — мылонафт, асидол, омыленный пек, олеиновая кислота и др. Производство вяжущих веществ не обходится иногда и без применения в них ускорителей или замедлителей твердения. В качестве ускорителей (катализаторов) используют хлористый кальций, хлористый натрий, соляную кислоту, жидкое стекло, нитрит натрия и др., а в качестве замедлителей твердения (ингибиторов) — двуводный гипс, серную

кислоту, сернокислое железо, клеи, ССБ и СДБ (соли лигносульфоновых кислот) и др. Для улучшения формовочных свойств могут вводиться пластификаторы — порошкообразные вроде глины, бентонита, трепела, диатомита, извести (оксида кальция) и др. или в виде жидкости типа ПАВ. В качестве интенсифицирующих добавок при помоле вяжущего вещества применяют антрацит и другие углеродистые добавки.

Направление химических и физико-химических процессов при производстве вяжущих веществ зависит от многих факторов и, в первую очередь, от состава сырья, однородности его компонентов, характера и количества примесей, структурных и текстурных особенностей применяемых горных пород в качестве компонентов сырья, технологического и термического режимов. Ввиду многообразия этих факторов трудно выдержать строго постоянным состав и свойства готового продукта — вяжущего вещества. Активным корректированием состава сырьевой смеси с введением некоторых дополнительных ингредиентов, а также варьирования режимов при выполнении операций представляется возможным увеличивать однородность состава и качества вяжущего материала. Понятно, что приготовление вяжущих веществ всегда усложняется по мере перехода от однокомпонентного сырья к сырьевым смесям, состоящим из двух и более компонентов. Впрочем, понятие однокомпонентности тоже достаточно условно вследствие возможных примесей в природном сырье.

Принципиальная схема технологии вяжущих веществ нуждается в конкретизации специфических особенностей при изготовлении отдельных типов вяжущих материалов.

9.1.3. ВОЗДУШНЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА И ИХ ПРОИЗВОДСТВО

Гипсовые вяжущие материалы — воздушные вещества, получаемые из гипсового камня или ангидрита. По своим технико-экономическим показателям они относятся к эффективным строительным материалам, что обусловлено огромными запасами природного сырья, относительно низким расходом топлива при их получении, короткими сроками схватывания и твердения. Весь технологический цикл изготовления изделий на основе гипсовых вяжущих веществ можно осуществлять в заводских условиях.

Подготовка сырья заключается в его тонком измельчении либо в грубом дроблении до размеров щебня или более крупных кусков (до 70—300 мм), что зависит от типа аппарата для последующей тепловой обработки. Основной операцией является обжиг сырья с целью частичной или полной его дегидратации. Он может быть низко- и высокотемпературным.

При низкотемпературной тепловой обработке сырья в аппаратах, сообщаемых с атмосферой (например, в открытых варочных котлах, сушильных барабанах, шахтных печах и др.), в которых температура поддерживается на уровне 110—180°C, продукт обжига становится полуводным гипсом $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. Эта разновидность продукта обжига называется гипсом β -модификации и при измельчении его в тончайший порошок образуется вяжущее вещество, называемое строительным гипсом (рис. 9.1).

При низкотемпературной тепловой обработке сырья в герметически закрытых аппаратах (пропарниках, автоклавах и др.), в которых температура поддерживается на уровне 95—100°C, а давление пара — повышенное, равное 0,15—0,3 МПа (в автоклавах до 0,6 МПа), продукт после частичной дегидратации также становится полугидратом $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, но другой, α -модификации (хорошо просушенного и охлажденного полугидрата). При измельчении в тончайший порошок образуется вяжущее вещество, называемое высокопрочным гипсом. Тот же эффект получается при тепловой обработке (кипячении) сырья в водных растворах некоторых солей, например хлористых кальция и магния.

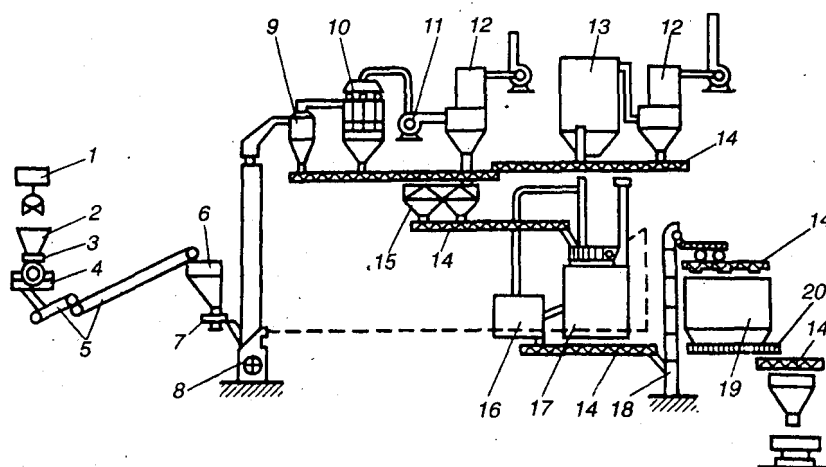


Рис. 9.1. Схема производства строительного гипса с применением варочных котлов: 1 — мостовой грейферный кран; 2 — бункер гипсового камня; 3 — лотковый питатель; 4 — щековая дробилка; 5 — ленточные конвейеры; 6 — бункер гипсового щебня; 7 — тарельчатый питатель; 8 — шахтная мельница; 9 — двойной циклон; 10 — батарея циклонов; 11 — вентилятор; 12 — рукавные фильтры; 13 — пылесадительная камера; 14 — шнеки; 15 — бункер сырого молотого гипса; 16 — камера томления; 17 — гипсоварочный котел; 18 — элеватор; 19 — бункер готового гипса; 20 — скребковый конвейер

Различие между обеими модификациями низкотемпературного гипса состоит преимущественно в размере и характере кристаллов: кристаллы α -модификации — крупные в виде длинных прозрачных игл или призматические, которые формировались в условиях капельножидкой водной среды, кристаллы β -модификации — мелкие с нечетко выраженными гранями. Если первые кристаллы полностью обезвоживаются только при

температурах 200—210°C, то вторые достигают этого уже при температурах 170—180°C. В обоих случаях обезвоживания не наблюдается видимых изменений в кристаллических структурах. Обезвоженные полугидраты имеют ту же кристаллическую решетку, что и полугидрат. Для производства высокопрочного гипса требуется сырье (камень) первого сорта.

Качественные характеристики получаемых двух видов гипса не одинаковы по ряду показателей. Строительный гипс — порошок белого цвета плотностью 2,2—2,5 г/см³. Его средняя плотность в рыхлом состоянии 800—1100 и в уплотненном — 1250—1450 кг/м³. Он обладает высокой водопотребностью: для получения теста нормальной густоты необходимо 50—70% воды по массе, а удобоукладываемое тесто в производственных условиях требует до 60—80% воды от массы вяжущего вещества. По срокам схватывания гипс различают: быстросхватывающийся (начало через 2 мин, конец — не позднее 15 мин), нормально-схватывающийся (начало через 6 мин, конец — не позднее 30 мин), медленносхватывающийся (начало — не ранее 20 мин, окончание схватывания не нормировано). По пределу прочности при сжатии через 1,5 ч после изготовления образцов имеется 12 марок — от Г-1 до Г-25 (цифры обозначают минимально допустимый предел, МПа). Эта разновидность гипса имеет низкую водостойкость, при увлажнении он склонен к ползучести. При более тонком помоле продукта обжига из β-полугидрата сульфата кальция получают гипс формовочный, при использовании сырья повышенной чистоты — медицинский гипс.

Высокопрочный гипс имеет плотность 2,72—2,75 г/см³, а его средняя плотность — в тех же пределах, что и гипса строительного. Водопотребность для нормальной густоты теста — около 40—45%, т. е. более низкая, что вызвано его пониженной удельной поверхностью и повышенной крупностью кристаллов. Он обладает повышенной прочностью при сжатии (свыше 25—30 МПа), но не водостоек и имеет тенденцию к ползучести во влажном состоянии (1—3% влаги). Прочность при растяжении в 6—8 раз меньше, чем при сжатии образцов в сухом состоянии. В последние годы в нашей стране были проведены исследования (С.В. Мамбетшаев, А.А. Мороз) по расширению сырьевой базы за счет снижения содержания требований к содержанию двуводного гипса (вплоть до 3-го сорта) за счет улучшенной технологии со снижением до минимума остаточного и вторичного двуводного гипса и переводом их в β-модификацию гипса. Получается улучшенный высокопрочный гипс для изготовления гипсобетона, раствора, арболита и других изделий. Строительный и формовочный гипс с успехом используют при производстве перегородочных панелей, сухой штукатурки, гипсо-литных деталей, вентиляционных коробов, огнезащитных и звукопоглощающих изделий и др.

При температурах 450—750°C растворимый ангидрит переходит в нерастворимый, вследствие чего тесто из порошкообразного ангидрита и воды практически не твердеет. На его базе основано производство ангидритового цемента — продукта обжига природного двухводного гипса при температуре 600—700°C с последующим тонким помолом с добавлением минеральных веществ. К таким добавкам относятся смесь сульфата и бисульфата натрия с медным купоросом, известь (2—5%), основной доменный шлак (10—15%) и др. В присутствии указанных добавок ангидрит взаимодействует с водой и приобретает способность схватываться и твердеть. Предел прочности при сжатии у ангидритового цемента составляет 10—20 МПа, начало схватывания наступает не ранее 30 мин, конец — не позднее 24 ч.

Гипс высокообжиговый (экстрих-гипс) получают при обжиге гипсового сырья до температур 800—950°C, когда продукт обжига вновь приобретает свойства схватываться и твердеть без каких-либо добавочных веществ. Эта «добавка» возникает в обжигаемом сырье вследствие термической диссоциации сернокислого кальция ($2\text{CaSO}_4 \rightarrow 2\text{CaO} + 2\text{SO}_2 + \text{O}_2$) в виде свободного оксида кальция. Отдельные специалисты полагают, что вместо свободного оксида кальция имеется $m\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Тонко измельченный порошок и является высокообжиговым гипсом (экстрих-гипсом). Начало схватывания теста из

эстрих-гипса наступает не ранее 2 ч, но его можно ускорить добавками, например K_2HPO_4 ; предел прочности при сжатии составляет 10—20 МПа, а водостойкость несколько выше, чем у низкотемпературных гипсовых вяжущих и ангидритового цемента. Его применяют для изготовления декоративных и отделочных материалов, например, искусственного мрамора, штукатурных растворов, устройства бесшовных полов и подготовки оснований под линолеум и др.

В целях улучшения качества эстрих-гипса некоторыми исследователями (А.В. Волженским и др.) рекомендуется применять сырье с содержанием до 5—7% доломитов и известняков и до 7—10% глинистых примесей. Тогда возникает некоторое количество силикатов, алюминатов и ферритов кальция, повышающих водостойкость готового продукта обжига. Но ее можно повысить и введением гидрофобных добавок или минеральных — шлака, извести, портландцемента и др.

Воздушная строительная известь — вяжущее, получаемое равномерным и умеренным (до спекания) обжигом горных пород, содержащих большее или меньшее количество углекислого кальция.

Среди таких пород — известняки, мел, доломитизированные известняки, имеющие весьма ограниченное содержание (до 6% по массе) глинистых примесей. Имеются в породах и другие примеси — углекислый магний, кварц, оксид железа. Для получения воздушной извести требуется поддерживать температуру обжига на уровне 900—1200°C, что зависит в основном от состава сырья. Обжиг проводится до полного удаления углекислого газа в соответствии с уравнением термической диссоциации: $\text{CaCO}_3 + 178 \text{ кДж} = \text{CaO} + \text{CO}_2$. Образуется белое огнестойкое вещество, техническое название которого — негашеная известь.

Сырье обжигают в печах различных конструкций: шахтных, вращающихся, циклонно-вихревых (во взвешенном состоянии), а также на движущихся агломерационных решетках. Распространен обжиг в шахтных печах, которые работают либо по пересыпному способу, либо с выносимыми топками (рис. 9.2). Они надежны в эксплуатации, позволяют использовать местные виды топлива и при меньшем его расходе на единицу готовой продукции. Загружаемый в шахтную печь известняк имеет обычно размеры 80—200 мм, а при обжиге во вращающейся печи используют дробленый известняк размером 5—20 и 20—40 мм. В процессе обжига сырья протекает декарбонизация. При выходе из печи размеры обожженной (комовой) извести сохраняются в основном прежними до погрузки в печь, но за счет потери CO_2 становятся высокопористыми и легкими. При дальнейшем измельчении комовой извести ее предварительно дробят до размера 15—20 мм. Далее — помол в шаровых одно- и многокамерных мельницах по замкнутому циклу с рассевом продукта в сепараторе. Получаемый продукт носит название молотой негашеной извести того же состава (оксида кальция).

Молотая негашеная известь получила применение в качестве вяжущего вещества в результате исследований И.В. Смирнова в конце XIX — начале XX вв. Однако работать с ней сложнее, чем с гашеной известью, но по качеству она выше, являясь более активной в формировании структур ИСК.

Гашение комовой извести с превращением ее в тончайший порошок — уникальный технологический прием химического диспергирования. Оно производится в специальных гидрататорах периодического или непрерывного действия. В условиях стройплощадки гашение небольшого объема извести производят в творильных ящиках с сеткой для сцеживания разжиженного известкового теста (известкового молока) в гасильную яму, где оно выдерживается не менее двух недель. Опасно применять тесто, в котором имеется непогасившаяся известь.

Реакция гашения протекает с выделением большого количества теплоты: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + q$, где q — количество теплоты, равное 1160 кДж (277 ккал) на 1 кг оксида кальция. Эта теплота вызывает вскипание воды, что послужило основанием именовать негашеную известь кипелкой. Погасившаяся известь превращается в тонкий рыхлый

порошок со значительным увеличением в объеме (в 2,5—3 раза) — пушонку. При избытке воды (например, больше чем в среднем 1,5 л на 1 кг кипелки) известь переходит в известковое тесто; рабочее состояние — при 50% воды.

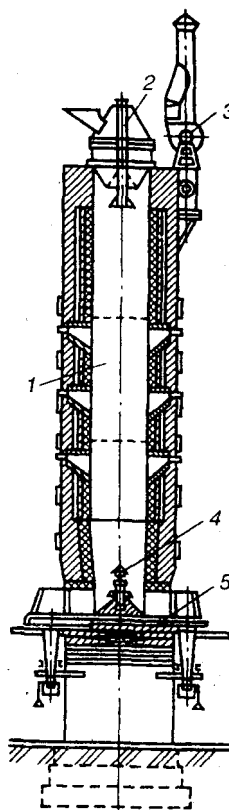


Рис. 9.2. Шахтная печь для обжига извести: 1 — шахта; 2 — загрузочный механизм; 3 — дымосос; 4 — гребень для подачи воздуха; 5 — разгрузочный механизм

Таким образом различают следующие виды воздушной извести: известь негашеная комовая, известь негашеная молотая, известь гашеная (пушонка), известковое тесто. Основным компонентом воздушной извести служит оксид кальция, которому практически всегда сопутствует оксид магния. По содержанию оксида магния (MgO) известь разделяют на маломagneзиальную (меньше 5%), магнезиальную (5—20%) и доломитовую (20—40%). Присутствие оксида магния, который находится обычно как бы в пережженном состоянии, замедляет скорость гашения извести. Различают известь быстрогасящуюся — при скорости ее гашения меньше 8 мин, сред-негасящуюся, если скорость не превышает 25 мин, и медленногасящуюся — если скорость гашения составляет не менее 25 мин. За скорость гашения принимается время, прошедшее от момента приливания воды к извести до начала снижения максимальной температуры, что определяется в лаборатории завода.

В соответствии с ГОСТ 9179-77 строительная воздушная известь подразделяется на три сорта для негашеной извести, на два сорта для гашеной извести. Содержание активных $CaO + MgO$ (в пересчете на сухое вещество) для негашеной извести без добавок должно быть соответственно для 1, 2 и 3-го сортов 90, 80 и 70%; для негашеной извести с добавками для 1-го и 2-го сортов — 65 и 55%. Строго нормируется допустимое содержание непогасившихся частиц, (в %). Прочность извести стандартом не нормируется, так как она невелика; у пушонки через 28 суток 0,5—1,0 МПа, у молотой извести 1,0—6,0 МПа. Средняя плотность пушонки равна 400—450 кг/м³.

Известь всех видов находит широкое применение в качестве вяжущего и водоудерживающего компонента в строительных растворах для кладки, штукатурки, а также в производстве строительных материалов как составная часть смешанных вяжущих

веществ и изделий, например для изготовления силикатных материалов автоклавного твердения. Основное количество извести, как и гипсовых вяжущих веществ, используют в производстве штучных и крупногабаритных изделий, в керамической промышленности, стеклоделении, металлургической промышленности и других отраслях.

Магнезиальные вяжущие вещества — продукты умеренного обжига природных карбонатных пород: магнезита и доломита с получением после тонкого помола соответственно каустического магнезита при температурах 750—850°C и каустического доломита при температурах 650—750°C. При обжиге природный магнезит разлагается и превращается в оксид магния по реакции: $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$.

При условии полного выделения углекислого газа качество каустического магнезита тем выше, чем ниже температура обжига.

Оксид магния может получаться также обжигом металлургического магнезита при температурах 1100—1300°C, но вяжущими свойствами такой «намертво обожженный» магнезит почти не обладает и используется в качестве сырья для производства магнезитовых огнеупоров.

В каустическом магнезите содержится оксида магния до 85% по массе и более, тогда как допустимое содержание оксида кальция лимитируется 2—5%. Он представляет собой тонкий порошок белого или желтоватого цвета. Начало схватывания должно наступать не ранее 20 мин, а конец схватывания — не позднее 6 ч от момента затворения теста. Его истинная плотность 3,15—3,40 г/см³, что значительно выше, чем у извести и гипсов, а также выше, чем у портландцемента. По пределу прочности при растяжении образцов из теста нормальной густоты каустический магнезит должен иметь не менее 1,5 МПа. Предел прочности при сжатии образцов-кубиков из каустического магнезита состава 3:1 (3 части магнезита, 1 часть (по массе) сосновых опилок) изменяется от 30 до 50 МПа и выше.

Вторая разновидность магнезиального вяжущего вещества — каустический доломит — получается в соответствии с термохимической реакцией разложения: $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{MgO} + \text{CO}_2$. Видно, что при обжиге природный доломит разлагается с образованием в основном оксида магния, а большая часть карбоната кальция остается не разложившейся, так как температура его диссоциации, что уже отмечалось выше, равна около 900°C. В получаемом после обжига и помола каустическом доломите карбонат кальция остается в виде неактивного порошкообразного наполнителя, поэтому реакционная активность каустического магнезита выше, чем каустического доломита, и соответственно выше его прочность (прочность каустического доломита 10—30 МПа).

Оба вида магнезиальных вяжущих веществ затворяют в тесто не чистой водой, как другие неорганические вяжущие материалы, а водным раствором некоторых солей — хлористого магния, сернокислого магния, сернокислого железа, количество которых соответствует определенной плотности раствора. Получаемое после затворения вяжущее именуется цементом Сореля.

Магнезиальные вяжущие вещества характеризуются повышенной прочностью сцепления с каменными и древесными материалами, особенно прочностью на разрыв, например под действием центробежных сил. Поэтому их применяют в абразивном производстве для изготовления жерноточильных кругов, брусьев и др. Главное их назначение в строительстве — изготовление ксилолита для бесшовных полов или фибролита для производства теплоизоляционных изделий и перегородок. Их используют также для растворов при штукатурных работах, на изготовление подоконных плит, лестничных ступеней, кровельных плит и других строительных деталей.

Растворимое стекло и кислотоупорный цемент. *Растворимое (жидкое) стекло* представляет собой щелочной натриевый или калиевый силикат переменного химического состава, выражаемого общей формулой $\text{R}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$, где R может быть Na или K. Величина n — силикатный модуль, имеющий значение от 2,56 до 3,00, в зависимости от чего меняются основные свойства растворимого стекла. Жидкое стекло склеивает и твердеет на воздухе вследствие высыхания, а также выделения аморфного или

гелеобразного кремнезема под влиянием воды и углекислоты воздуха. Для ускорения твердения и повышения водостойкости вводят различные катализаторы, главным образом кремнефтористый натрий Na_2SiF_6 . Они ускоряют выделение геля кремневой кислоты. Сырьем для изготовления растворимого стекла служат чистый кварцевый песок, сода Na_2CO_3 или сульфат натрия Na_2SO_4 . Значительно реже вторым компонентом служит поташ K_2CO_3 . После варки тщательно перемешанной сырьевой смеси в стекловаренных печах при температуре 1300—1400°C жидкое стекло быстро охлаждается на металлических листах. Образуются полупрозрачные, зеленоватого цвета куски силикат-глыбы. Силикат-глыбу растворяют в автоклавах паром под давлением 0,6—0,8 МПа и температуре 150°C, переводя в состояние коллоидного раствора с истинной плотностью 1,40—1,55 г/см³ (табл. 9.1). Перед применением жидкого стекла производится дальнейшее разбавление раствора до необходимой консистенции.

Таблица 9.1. Свойства силикат-глыбы и жидкого стекла

<i>Показатели</i>	<i>Виды стекла</i>		
	<i>содовое</i>	<i>содово-сульфатное</i>	<i>сульфатное</i>
<i>Истинная плотность</i>	1,50—1,55	1,48—1,50	1,48—1,50
<i>Модуль силикатный стекла</i>	2,6—3,0	2,56—3,00	2,56—3,00
<i>Содержание воды, %, не более</i>	57	60	60

Растворимое стекло хранят в закрытой таре, а перевозить его экономичнее в твердом виде (силикат-глыбы) с последующим растворением на стройках в передвижных или стационарных установках.

Этот вяжущий материал применяют для затворения кислотоупорного цемента при изготовлении соответствующего бетона, предохранения поверхности природных камней от выветривания, изготовления огнезащитных (для древесины) красок, замазок, устройства силикатированного шоссе на основе известнякового щебня, жароупорных бетонов, силикатизации (пропитки) грунтовых оснований и других целей.

Кислотоупорный цемент представляет собой кварцевый порошкообразный материал. Он изготавливается путем совместного помола или тщательного смешения отдельно измельченных: кварцевого песка и кремнефтористого натрия в соотношении 10:1 (по массе); затворяется на водном растворе жидкого стекла (силиката натрия) и после затвердевания способен в строительных растворах или бетонах противостоять воздействию большинства минеральных и органических кислот. Водный раствор стекла принимается с истинной плотностью 1,345, что соответствует 37° по Боме. Содержание оксида кремния в кислотоупорном цементе превышает 92%. Тонкость его помола нормируется просеиванием на ряде стандартных сит. Обычно нормируются и требования к срокам схватывания цемента: начало для теста нормальной густоты должно наступать не ранее 20 мин, конец — не позднее 8 ч от начала затворения. Прочностная характеристика цемента выражается пределом прочности при растяжении стандартных образцов после твердения их в течение 30 суток. При хранении на воздухе без кипячения или после кипячения в серной кислоте предел прочности должен быть не менее 2 МПа. Керосинопоглощение образцов в 10-дневном возрасте должно быть не более 15%. Прочность кислотоупорного бетона достигает 50—60 МПа, но он теряет прочность в воде, а в едких щелочах разрушается. В бетонах используют кислотоупорные заполнители: кварцевый песок, андезит и др. Такие бетоны применяют на химических заводах для изготовления резервуаров, ванн и других емкостей, а растворы — при футеровке кислотоупорными плитками различных конструкций.

9.1.4. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА И ИХ ПРОИЗВОДСТВО

Гидравлическая известь — продукт умеренного обжига (не до спекания) мергелистых известняков, содержащих от 6 до 20% глинистых примесей. Обычный интервал температур обжига составляет 900—1100°C, что зависит от состава сырья. Продукт обжига содержит не только свободную известь, но и химические соединения с оксидами глины: силикаты $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, алюминаты $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, ферриты $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ кальция. Подобно воздушной извести этот продукт составляет комовую гидравлическую известь, которую подвергают помолу в мельницах с получением тонкомолотой негашеной извести. Реже используют другой вариант: комовую известь гасят, а непогасившиеся частицы (силикатов, алюминатов и ферритов) подвергают дополнительному измельчению с последующим смешением погасившейся и непогасившейся частей.

При взаимодействии с водой силикаты и алюминаты в извести остаются практически негидратированными. Только при гашении этой извести в тесто постепенно образуются гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, что сопровождается набуханием этих соединений и переходом их в студнеобразное состояние. В зависимости от содержания в извести оксида кальция, по отношению к сумме диоксида кремния, полуторных оксидов алюминия и железа можно условно разделить на сильно гидравлическую и слабо

гидравлическую. Отношение $m = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$ называется модулем

основности и для сильногидравлической извести он равен 1,7—4,5, а для слабогидравлической — 4,5—9,0. Модуль основности характеризует способность извести к твердению в водной среде, а при $m > 9,0$ известь является типичным воздушным вяжущим веществом. Кроме того, модуль m косвенно отражает также и механическую прочность затвердевшего теста (или раствора). Следует отметить, что если для гашения извести воздушной в тесто требуется ввести 70—80% воды, то для гидравлической — около 20 %.

Гидравлическая известь не обладает высокой прочностью. При ее определении в образцах из раствора состава 1:3 (с нормальным песком) прочность при сжатии должна быть 2-5 МПа через 28 суток комбинированного хранения (7 суток во влажном воздухе и 21 сутки в воде).

В настоящее время гидравлическая известь имеет ограниченное применение — для строительных растворов и бетонов невысокой прочности, для кладки в сырых местах (подвалах, каналах), в малоэтажном строительстве и др. Совсем не изготавливается теперь роман-цемент — гидравлическое вяжущее вещество, получавшееся измельчением в тонкий порошок умеренно обожженных (не до спекания) известковых или магнезиальных мергелей при содержании в них глинистых примесей до 25—35%. Эту разновидность цемента полностью вытеснил портландцемент.

Портландцемент — продукт тонкого измельчения клинкера, получаемого в результате равномерного обжига до спекания природного сырья (мергеля) или искусственной однородной сырьевой смеси определенного состава, содержащей известняк и глину. В процессе помола клинкера добавляют гипсовый камень в количестве до 3,5% (в пересчете на серный ангидрит). Можно частично заменить сырьевую смесь доменным шлаком, нефелиновым шлаком, опокой и др. при условии, что сырье сохраняет необходимый расчетный состав.

Природное минеральное сырье в виде известкового мергеля встречается редко, приходится ориентироваться, в основном, на искусственные сырьевые смеси. Как отмечено, они состояются с помощью пород с высоким содержанием углекислого кальция (чистых известняков, мела, известковых туфов, мергелистых известняков и др.) и пород, относящихся к глиноземистому сырью (тяжелые глины, мергелистые глины, глинистый сланец и др.). Исходя из химического состава сырьевой смеси и заданной

характеристики состава клинкера вычисляют соотношение между ее компонентами с возможно большей точностью. Вид сырья отражается на выборе оборудования, необходимого для его подготовки, обжига и помола продукта обжига с добавками и с переводом их в состояние однородного мельчайшего порошка — портландцемента.

В зависимости от характера приготовления сырьевой смеси различают мокрый, сухой и комбинированный способы производства портландцемента. Каждый из этих способов имеет свои особенности, достоинства и недостатки. В нашей стране на цементных заводах преобладает пока мокрый способ, хотя многие заводы перестраивают технологию на более экономичный по расходу топлива сухой и комбинированный способы.

При мокром способе (рис. 9.3) сырьевую смесь измельчают в шаровых мельницах в присутствии большого количества воды (до 36—42% массы сухого вещества) и получают жидкотекучую массу, или суспензию. Ее называют шламом. Из шлам-бассейна 7 масса направляется для обжига во вращающуюся печь 8. Мокрый способ целесообразно использовать при применении в качестве компонентов мела, сырой глины, что понижает расход электроэнергии на измельчение сырьевой смеси. При этом способе облегчается транспортирование и перемешивание сырьевой смеси, однако расход топлива на обжиг ее в печи в 1,5—2 раза больше, чем при сухом способе.

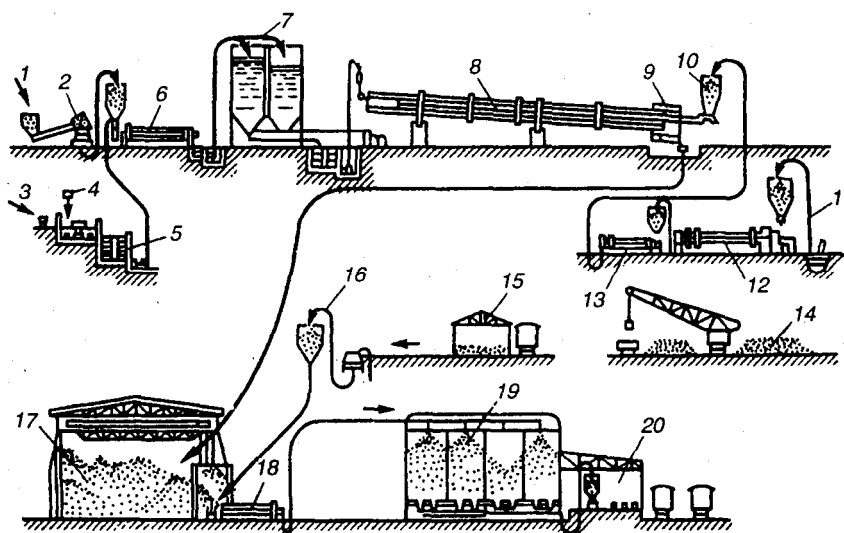


Рис. 9.3. Технологическая схема производства портландцемента по мокрому способу:

1 — подача известняка из карьера; 2 — дробилка для известняка; 3 — подача глины из карьера; 4 — подача воды; 5 — бассейн для размешивания глины; 6 — сырьевая мельница; 7 — шлам-бассейны; 8 — вращающаяся печь; 9 — холодильник; 10 — подача угольной пыли в печь; 11 — элеватор для подачи угля из дробилки в бункер; 12 — сушильный барабан для угля; 13 — мельница для угля; 14 — склад угля; 15 — склад гипса; 16 — элеватор для подачи гипса из дробилки в бункер; 17 — склад клинкера; 18 — шаровая мельница; 19 — силосы для цемента; 20 — упаковка цемента

При сухом способе готовят сухой порошок смеси исходных материалов (так называемая сырьевая мука), который обжигают во вращающейся печи.

Комбинированным называют способ производства, при котором сырьевая смесь для обжига подготавливается в виде гранул. Шлам обезвоживают до влажности 16—18% и полученный «сухарь» (корж) перерабатывают в гранулы на специальных грануляторах. Можно также увлажнять сырьевую муку до 12—15% и из нее изготовлять те же гранулы для обжига. Комбинированный способ, по сравнению с мокрым, дает до 20—30% экономии топлива.

При всех способах весьма важно обеспечить бесперебойное поступление сырьевой смеси на обжиг для получения из нее портланд-цементного клинкера.

Обжиг сырьевой смеси — центральный этап технологии цемента. Для обжига применяют два типа печей — шахтные и вращающиеся.

Для производства цемента мокрым и сухим способами применяют вращающиеся печи длиной от 150 до 230 м, диаметром 5—7 м и короткие длиной от 60 до 95 м с различными запечными устройствами (конвейерный кальцинатор, циклонные теплообменники, холодильники и др.).

Вращающуюся печь 8 (см. рис. 9.3) устанавливают с небольшим уклоном (3—4°) в сторону передвижения сырьевой смеси. Печь медленно (1—2 об/мин) вращается вокруг своей оси в подшипниках. Сырьевая смесь подается в печь автоматическим питателем с верхнего ее конца, а со стороны нижнего конца вдувают топливо — мазут, природный газ или воздушно-угольную смесь. Горячие газы направляются навстречу сырьевой массе. По всей длине вращающейся печи условно выделяют шесть зон, которые различают по основным физическим и химическим процессам, проходящим при нагревании. Внутри печи, облицованной надежной огнеупорной футеровкой, находятся различные внутripечные устройства для лучшего перемешивания и интенсивного прогрева сырья (фильтр-подогреватели шлама, цепные завесы, металлические и керамические теплообменники).

В зоне сушки испаряется свободная вода. Подсушенный материал комкуется и распадается на гранулы. В зоне подогрева при температуре от 200 до 700°C сгорают органические примеси, удаляется химически связанная вода и образуется каолиновый ангидрит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Обе эти подготовительные зоны составляют при мокром способе около половины длины печи, при сухом способе — значительно меньше. В зоне кальцинирования при интервале температур от 700 до 1100°C происходит диссоциация карбонатов CaCO_3 и MgCO_3 , а также разложение глинистого компонента на оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Они вступают в химическое взаимодействие с CaO . Протекают реакции, связанные с диффузионными процессами в твердом состоянии и с формированием новообразований (искусственных минералов). Вначале образуются однокальциевый алюминат $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (или в условном обозначении CA), а затем двухкальциевый силикат $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (или в условном обозначении C_2S). При температуре, близкой к 1200°C, однокальциевый алюминат, насыщаясь известью, переходит в пентакальциевый триалюминат $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ и затем в трехкальциевый алюминат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (или C_3A). Оксид железа образует с оксидом кальция двухкальциевый феррит $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (или C_2F) и четырехкальциевый алюмо-феррит $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (или C_4AF).

При достижении температуры примерно 1300°C все реакции в твердой фазе в основном завершаются, но часть извести остается в свободном состоянии. При дальнейшем повышении температуры (1300—1450°C) происходит частичное плавление сырьевого материала — спекание, чему особенно легко поддаются C_4AF , CaO и MgO . Обычное содержание жидкой фазы при температурах спекания составляет 15—30%. В твердом состоянии остается $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, но и он частично растворяется в этой жидкости, образуя с молекулярно-дисперсной известью трехкальциевый силикат $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (или C_3S), поскольку жидкая среда интенсифицирует диффузию молекул оксида кальция. C_3S выделяется из жидкой среды вследствие меньшей растворимости в расплаве в виде мельчайших, но способных к росту кристаллов. Это новообразующееся вещество в кристаллическом состоянии является главной составной частью портландцемента. Для его более полного выделения из расплава требуется температура 1450—1500°C со сравнительно длительным сохранением этих тепловых условий. Но даже при самых благоприятных условиях перевод всего двухкальциевого силиката в более устойчивое состояние в виде трехкальциевого силиката затруднителен. Для поддержания необходимой концентрации растворенных в расплаве извести и Ca_2S потребовались бы весьма высокие температуры и длительный период времени.

В сырьевых смесях, насыщенных известью, некоторая часть ее может остаться неусвоенной в процессе обжига. Однако свободной извести в портландцементе не должно быть выше 1—1,5% во избежание неравномерного изменения объема при его твердении.

При медленном охлаждении продукта обжига жидкая фаза может почти полностью перейти в продукты кристаллизации, а при очень быстром — в переохлажденную жидкость (стекло). Обычные тепловые режимы в печи благоприятствуют и кристаллизации, и частичному застекловыванию, причем стекло окаймляет отдельные кристаллы.

Таким образом, в результате внутренних химических и физико-химических процессов при обжиге сырьевой смеси образуется клинкер, в составе которого имеются сложные соединения как в кристаллическом состоянии — C_3S и C_2S , так и в стеклообразном — C_3A , C_5A_3 , C_4AF . Кроме того, присутствуют в нем MgO (главным образом в виде кристаллов периклаза), CaO и R_2O — в стекловидной фазе. Некоторые из этих соединений называются искусственными минералами, а именно: соединения C_3S и C_2S называются соответственно алитом и белитом. Эти минералы не являются химически чистыми компонентами клинкера. Так, например, C_3S может воспринять некоторое количество алюминатов; C_4AF воспринимает немного трехкальциевого алюмината и т.д. Поэтому микроскопический анализ показывает состав, который не совпадает с расчетным составом. По расчетному Минералогическому [составу] портландцементный клинкер можно разделить на группы: алитовый с содержанием алита свыше 55% и белита меньше 20%; белитовый — с содержанием алита меньше 40% и белита — больше 40%; нормальный с содержанием алита 40—55% и белита 20—40% при общем количестве во всех трех случаях $C_3A + C_4AF$ 20—25% (по массе); алюминатный — при содержании C_3A больше 10% и C_4AF меньше 15%; алюмоферритный — при содержании C_3A меньше 10% и C_4AF больше 15% при общем количестве силикатов, равном 75%.

Из вращающейся печи клинкер выходит в виде мелких гранул (10—40 мм) зеленовато-серого цвета, после чего его охлаждают воздухом до 100—200°C и направляют на магазинирование. Эта операция выражается в выдерживании клинкера на складе или в силосе для дальнейшего снижения его температуры и частичного самоизмельчения под влиянием тепловых перепадов, гашения свободной извести и других факторов.

При сухом способе подготовки сырья декарбонизация известняка обычно выносятся за пределы вращающейся печи — в декарбонизаторы, что позволяет использовать теплоту отходящих газов, ускорить процесс обжига, снизить расход топлива и энергозатрат, металлоемкость оборудования за счет уменьшения длины печи.

На основании изложенного можно заключить, что получаемый портландцементный клинкер характеризуется содержанием отдельных оксидов; соотношениями между содержанием главных оксидов, выражаемыми в форме модулей и коэффициента насыщения; содержанием клинкерообразующих соединений — клинкерных минералов.

Главнейшими оксидами клинкера являются CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Среди других оксидов, оказывающих нередко существенное влияние на качество цемента, следует отметить MgO , SO_3 , N_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Mn_2O_3 . Три последних оксида встречаются в очень малых количествах и при расчетах обычно их не учитывают. Химический состав клинкера характеризуется следующими пределами содержания вышеуказанных оксидов (% по массе): CaO — 62—67%; SiO_2 — 20—24; Al_2O_3 — 4—8; Fe_2O_3 — 2—5¹, других оксидов (MgO , SO_3) — 1—3%.

Имея химический состав, нетрудно определить приближенные значения модулей: основного, или гидравлического, m , который был указан выше при описании гидравлической извести (см. 8.2.1),

¹ Для ориентировки следует учесть, что первый оксид (CaO) составляет $\frac{2}{3}$ всего количества; каждый последующий (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) — $\frac{1}{3}$ количества предыдущего оксида («Мнемоническое правило»).

силикатного, или кремнеземного, $n = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3}$ и алюминатного, или

глиноземного, $p = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$. Модули должны быть в пределах: $m = 1,9—2,4$; $n = 1,7—3,5$;

$p = 1,0—2,5$.

В настоящее время редко используется в расчетах основной, или гидравлический, модуль для характеристики клинкера. Однако всегда определяется коэффициент насыщения (КН), показывающий отношение количества извести, остающейся после полного насыщения глинозема, оксида железа и серного ангидрита, к тому количеству извести, которое необходимо для полного насыщения кремнезема:

$$КН = \frac{CaO - (1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3)}{2,8SiO_2}. \text{ Этот коэффициент насыщения известью}$$

обычного цемента колеблется в пределах 0,82—0,95. Повышенное значение коэффициента насыщения ($КН > 1$) означает наличие свободной извести, что может вызвать неравномерное изменение объема, трещинообразование, разрушение цементного камня и бетона. Его пониженное значение ($КН < 0,8$) связано с замедленным процессом твердения цементного теста и уменьшением прочности (марки) портландцемента.

Указанные модули сравнительно четко характеризуют свойства цемента. Так, например, цементы с высоким силикатным модулем медленно схватываются и твердеют, но с течением времени они достигают весьма высоких прочностей. У таких цементов имеется повышенная стойкость к воздействию минерализованной воды. Однако в период изготовления клинкера с высоким силикатным модулем затрудняются процессы спекания, требуется повышенная температура. Наоборот, низкий силикатный модуль придает сырьевой смеси чрезмерную легкоплавкость и в связи с образованием натеков и кусков на футеровке печи также затрудняет обжиг.

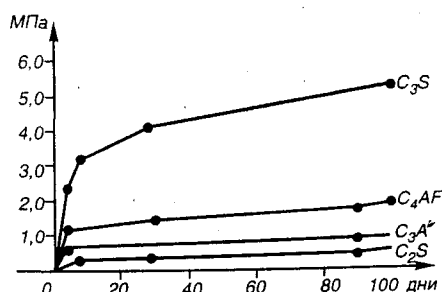


Рис. 9.4. Пределы прочности клинкерных компонентов при испытании на сжатие в разные сроки твердения (по данным С.Д. Окорочкова)

Цементы с высоким глиноземным модулем, что соответствует повышенному содержанию алюминатов кальция, быстрее схватываются и твердеют. Однако достигнутая в первые сроки прочность почти не возрастает при дальнейшем твердении. Такие цементы менее стойки к воздействию минерализованной воды. При малых значениях глиноземного модуля, т. е. при больших количествах в клинкере оксида железа, цементы медленнее схватываются и твердеют, но дают более высокую конечную прочность. Оксид железа облегчает обжиг клинкера, понижает температуру его спекания.

В цементах лимитируется содержание оксида магния (4—4,5%), так как, находясь в свободном состоянии, он может, вследствие медленной и более поздней гидратации, вызывать появление напряжений и трещин в изделиях. Основной характеристикой клинкера служит его минеральный состав, т. е. содержание C_3S , C_2S , C_3A и C_4AF . Учитывая, что каждому минералу портландцементного клинкера присущи свои особенности (рис. 9.4), которые в той или иной степени влияют на общие свойства

цемента, строителям нельзя обращать внимание только на прочностные показатели. По данным С.Д. Огорокова, наибольшей прочностью для всех сроков твердения обладает алит.

Наибольшей интенсивностью нарастания прочности отличается C_3A , но он, как и C_4AF , дает низкую прочность. Последнее место, как по абсолютным показателям прочности, так и по интенсивности роста прочности, занимает белит. Следует отметить, что в длительные периоды времени твердения белит способен набирать высокую прочность. Аналогичным образом ведут себя смеси из этих компонентов. Наибольшую прочность показали двухкомпонентные смеси алита и C_3A , наименьшую — алит в смеси с белитом и алит в смеси с C_4AF . Увеличение содержания C_3A до 15% повышает прочность в первые сроки твердения, но в дальнейшем дает уменьшение прочности. Содержание C_3A до 10% дает наилучший постоянный прирост прочности при объединении с C_3S , хотя отдельно C_3A как отмечалось выше, дает весьма малую прочность. В этом случае положительную роль сыграло присутствие в цементе гипса, который добавлялся при помоле клинкера. С ним образуется при твердении теста комплексная соль — кристаллический гидросульфат алюмината кальция $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31$ (или 32) H_2O , называемая этtringит. О ней подробнее изложено ниже в связи с коррозией бетона (см. 9.10).

При оценке качества и выборе необходимого для конкретных целей цемента, кроме прочностных показателей принимают во внимание деформативные, усадочные, тепловыделение, коррозиестойкость, морозостойкость и стойкость к внешним условиям работы строительных конструкций и другие свойства. Присутствие искусственных минералов клинкера в различных количествах и сочетаниях вносит свои коррективы в соответствующие показатели цемента.

Деформативная способность — удароустойчивость и пластичность — значительно выше у алюмоферритного цемента (20% C_4AF), практически лишенного трехкальцевого алюмината (по данным А.Е. Шейкина, C_3A было 1%). Алитоалюмоферритный цемент (по данным А.В. Саталкина) дает почти в 2 раза большую предельную растяжимость, чем алюминатный цемент. Содержание C_3A сильно уменьшает деформативную способность цемента, увеличивает вероятность трещинообразования. C_3A является наиболее хрупким минералом, тогда как C_4AF — наименее хрупким. Среднее положение занимают C_3S и C_2S . Аналогичное положение занимают минералы и по свойству их твердости.

Объемные деформации при твердении теста и бетона также зависят от минерального состава цемента. В.А. Кинд установил, что наибольшую усадку дает C_3A , а затем C_2S . Алит и алюмоферрит оказывают наименьшее влияние на объемные деформации цемента.

Неодинаково у минералов цементного клинкера и тепловыделение, которое влияет на среднюю температуру, развивающуюся при твердении цементного теста. Так, например, наибольшее количество теплоты выделяют C_3S и C_3A , которая на третьем месяце твердения составляет 200—220 кал/г. Третье место занимает C_4AF — 100 и последнее место — C_2S — 50—60 кал/г. Среднее количество теплоты, выделяемое цементами, колеблется в зависимости от минералогического состава от 50 до 140 кал/г, но в основном оно зависит от суммы C_3S и C_3A , как наиболее экзотермичных при твердении. По этой причине для бетонных работ в осенне-зимний период желательно использовать цемент с повышенным содержанием алита и C_3A , то же — при необходимости сокращения сроков изготовления бетонных и железобетонных изделий, особенно тонкоребристого типа. При изготовлении массивных бетонных конструкций требуется цемент с возможно меньшей экзотермией, например, типа белитового.

Разрушение портландцемента при сульфатной агрессии связано с наличием в нем алюмината кальция. Следовательно, в этой среде у цемента должен быть повышенным силикатный модуль, уменьшенное содержание C_3A , например не более 5%. Против воздействия кислот неустойчивы ни силикаты, ни алюминаты, так как происходит их растворение.

Приходится учитывать также, что морозостойкость, выражаемая многократным замораживанием и оттаиванием бетона, насыщенного водой (например, в опорах мостов на уровне воды), понижается при увеличении содержания C_3A в цементе.

Не являются пассивными ингредиентами щелочные оксиды K_2O , когда в бетоне используются заполнители в виде опала — аморфного кремнезема (SiO_2 , $n \cdot H_2O$), повышающие диффузию воды в бетон и осмотическое давление в нем вплоть до критического уровня и разрушения строительной конструкции.

Портландцемент применяют главным образом для бетонных и железобетонных конструкций в наземных, подземных и подводных сооружениях, в том числе и таких, которые подвержены попеременному замораживанию и оттаиванию. Для растворов они используются только в тех случаях, когда не имеется более дешевых вяжущих веществ — воздушной и гидравлической извести, смешанных цементов и др. В цементных растворах требуется предусмотреть введение водоудерживающих добавок — извести, глины, цемянки, золы, молотого известняка и др. Во всех случаях использования портландцемента непременно учитывают, что имеются и специальные разновидности этого вяжущего вещества — быстротвердеющий, сульфатостойкий, пластифицированный и гидрофобный, белый и цветной, тампонажный и др., а также смешанные на основе портландцемента или на основе извести. Кроме того, возможны к применению иные разновидности цементов, которые также необходимо иметь в виду при выборе рационального вяжущего вещества для конкретных строительных целей. Все они в той или иной мере рассмотрены ниже.

Здесь же важно отметить, что среди наиболее важных показателей качества портландцемента и других цементов является так называемая активность — показатель предела прочности, получаемый при испытании на осевое сжатие половинок образцов-балочек размером $4 \times 4 \times 16$ см, изготовленных из цементного раствора состава 1:3 (по массе) и $V/C = 0,4$, в возрасте 28-суточного твердения¹. При изготовлении цементного раствора используют нормальный песок Привольского месторождения, содержащий не менее 98% кварцевых зерен размером 0,5—0,9 мм. Образцы-балочки изготовляют по стандартной методике. По активности судят о марках цемента.

Маркой цемента принято именовать величину его активности, но с округлением до нижнего предела и с учетом его предела прочности при изгибе.

Различают следующие марки портландцемента: М 400, М 500, М 550 и М 600. Требования к маркам портландцемента и некоторым его разновидностям приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2. Требования к маркам портландцемента и его разновидностям

Наименование цемента	Марка цемента	Предел прочности при изгибе, МПа, в возрасте, сут.		Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут.	
		3	28	3	28
Портландцемент и портландцемент минеральными добавками*	400	—	5,5	—	40
	500	—	6,0	—	50
	550	—	6,2	—	55
	600	—	6,5	—	60
Быстротвердеющий портландцемент	400	4	5,5	25	40
		4,5	6,0	28	50
Шлакопортландцемент	300	—	4,5	—	30
	400	—	5,5	—	40
	500	—	6,0	—	50
Быстротвердеющий	400	3,5	5,5	20	40

¹ Одни сутки образцы в формах хранятся, во влажном воздухе и 27 суток — освобожденные от форм в воде; температура $20 \pm 2^\circ C$.

* Допускается выпускать портландцемент с минеральными добавками марки 500 с пределом прочности 28 суток твердения при изгибе не менее 4,5 МПа и при сжатии не менее 30 МПа.

Допускается ускоренное испытание на определение активности, например в возрасте 3 или 7 суток, но с последующим уточнением данных применительно к нормальному 28-суточному возрасту испытания образцов.

Кроме активности по стандарту, желательно, в соответствии с теорией ИСК и ее законом конгруэнции (см. 3.2), определять еще расчетную активность портландцемента (и других видов вяжущего вещества). Под расчетной активностью подразумевается предел прочности при сжатии (или при других видах напряженного состояния) цементного камня оптимальной структуры, полученного и испытанного с учетом реальных условий ИСК на основе этого цемента. Зафиксированная величина активности называется расчетной потому, что входит в формулы для расчета соответствующей прочности бетона оптимальной структуры. Стандартная же активность является некоторой условной, нужной для товарной маркировки цемента, т. е. для сравнения его с другими цементами. В техническую характеристику портландцемента входят такие показатели (в количественных значениях): тонкость помола, плотность, сроки схватывания, равномерность изменения объема (по данным визуального осмотра образцов). Все они обусловлены стандартными методиками их определения.

Тонкость помола оценивают по количеству цемента, прошедшему через сито с сеткой № 008 (размер ячейки в свету 0,08 мм); должно просеиваться не менее 85% массы просеиваемой пробы. Значимой величиной в оценке тонкости помола служит удельная поверхность частиц цемента, определяемая с помощью поверхностомера. Средний размер частиц цемента составляет 15—20 мкм, что соответствует удельной поверхности, равной 2500—3000 см²/г.

Плотность портландцемента без минеральных добавок равна 3,1 г/см³, насыпная плотность в среднем — 1300 кг/м³.

Сроки схватывания — начало не ранее 45 мин, конец — не позднее 10 ч от начала затворения цемента водой в тесто нормальной густоты. Под последней понимается количество воды, в % по массе, которое потребовалось ввести, чтобы пестик в приборе Вика мог опуститься в кольцо с тестом на глубину, при которой он не доходит до дна на 5—7 мм. Нормальная густота портландцемента обычно находится в пределах от 22 до 28%. В цементе, содержащем активные минеральные добавки, нормальная густота может возрастать до 32—35%.

Равномерность изменения объема, при своей простоте определения, является важной характеристикой цемента. Она выражается в визуальной оценке состояния образцов-лепешек из теста нормальной густоты в возрасте 24 ч, прошедших трехчасовое кипячение в воде. По стандарту образцы не должны деформироваться или иметь радиальные трещины. Эти дефекты возможны при гидратации свободной извести СаО или периклаза MgO, оказавшихся в цементе сверх допустимого предела и вызвавших местные деформации испытываемых образцов.

Все необходимые сведения о технических свойствах цемента сообщаются потребителям, получающим цемент с завода, в виде паспорта на поставляемую партию цемента. Размер партии может составлять от 300 до 400 т, но паспорт относится обычно к партии цемента в 200—300 т.

Разновидности портландцемента. *Быстротвердеющий портландцемент*, как уже отмечалось, получается в основном за счет повышенного содержания в клинкере быстротвердеющих минералов C₃S и C₃A, т. е. чтобы цемент был алиитоалюминатным. Желательное содержание этих минералов находится в пределах: C₃S — 50—60%, C₃A — 8—12%, а сумма их — не менее 65%. Повышенное содержание этих соединений должно

сопровождаться и повышенным содержанием двуводного гипса, вводимого при помоле клинкера. Гипсового камня принимается такое количество, которое может быть химически связано в твердеющем портландцементом тесте в течение первых 24 ч после его затворения, что обычно составляет около 3% (2—5%).

Для ускорения процессов твердения необходим более тонкий и однородный помол сырьевой смеси, использование исходных материалов по возможности с аморфной структурой, поддержание повышенных температур при обжиге с добавлением в смесь минерализаторов (например, плавикового шпата), более быстрое охлаждение клинкера, выходящего из зоны спекания, более тонкий помол клинкера (до 3500—4000 см²/г). Скорость нарастания прочности цементного камня можно увеличить также путем введения химической добавки — хлористого кальция, соляной кислоты или других веществ аналогичного действия, вводимых в малых дозах.

Производство быстротвердеющего портландцемента началось в нашей стране с 1955 г., что позволило снизить расход цемента в бетоне и уменьшить энергозатраты на теплообработку изделий в, связи с укороченной ее продолжительностью.

Сверхбыстротвердеющий высокопрочный портландцемент (СБТЦ) отличается от быстротвердеющего (БТЦ) значительно более высокой ранней прочностью. Так, например, через 6 ч после затворения водой фиксируется прочность в 10 МПа, что в два раза больше получаемой при твердении теста на основе СБТЦ. При использовании СБТЦ можно через 1—4 ч получать прочность бетона, достаточную для распалубки изделий, расход цемента снизить до 20%, значительно сократить энергозатраты на теплообработку изделий.

В технологический период при изготовлении СБТЦ в сырьевую смесь вводят галогеносодержащие вещества, например фторид кальция, увеличивают в смеси содержание алюминатов.

В ряду быстротвердеющих и сверхбыстротвердеющих цемента возможно по своим свойствам расположить еще особобыстротвердеющий цемент. Он является высокопрочным и в возрасте 1 суток имеет предел прочности при сжатии 20—25 МПа. В нем 65—68% С₃S, С₃A до 8%. Его удельная поверхность — свыше 4000—4500 см²/г.

Сульфатостойкий портландцемент получают при совместном тонком помоле клинкера специального состава (с малым содержанием алюминатов кальция) с гипсом до 8%. Он и его разновидности имеют строго установленный химический состав: трехкальциевого силиката С₃S — не более 50%, трехкальциевого алюмината С₃A — не более 5%, а сумма С₃A и С₄AF — не выше 22%, оксида магния не более 5%. Сульфатостойкий портландцемент имеет марку 400, не должен содержать минеральных добавок, если они снижают морозостойкость бетонов на основе этих вяжущих веществ. Разновидности этого цемента: Сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками марок 400 и 500, Сульфатостойкий шлакопортландцемент марок 300 и 400 и пуццолановый портландцемент марок 300 и 400. Их применяют при строительстве подземных и подводных частей сооружений, подвергающихся сульфатной коррозии.

Обычный сульфатостойкий портландцемент применяют для изготовления бетонов, работающих в условиях сульфатной среды, например в морской воде, а также для бетонов повышенной морозостойкости.

Портландцементы с поверхностно-активными добавками. К ним относятся пластифицированный и гидрофобный.

Пластифицированный портландцемент — продукт тонкого измельчения портландцементного клинкера с двуводным гипсом (3—5%) и с добавлением при помоле около 0,25% сульфидно-дрожжевой бражки (СДБ) или другой пластифицирующей добавки. Эти добавки, адсорбируясь на поверхности частиц цемента, повышают смачиваемость цемента водой, не препятствуя их взаимодействию. Добавки уменьшают трение между зернами цемента, а в бетонных смесях — и между зернами заполнителя, вследствие чего повышают их подвижность, позволяют уменьшить расход цемента в бетоне на 5—10%.

Гидрофобный портландцемент — продукт тонкого измельчения портландцементного клинкера с двуводным гипсом (3—5%) и с добавлением при помоле 0,1—0,2% гидрофобизирующих добавок — мылонафта, синтетических жирных кислот, асидола. Синтетические жирные кислоты, их соли (мыла) и другие частицы, адсорбируясь на поверхности зерен цемента, образуют тончайшие водоотталкивающие пленки, уменьшающие смачиваемость цемента водой. В результате гидрофобные цементы могут длительное время пребывать на воздухе с повышенной влажностью без потери своей активности.

При перемешивании бетонной смеси целостность гидрофобной пленки нарушается, после чего цемент беспрепятственно взаимодействует с водой. Остающиеся добавки в теле бетона улучшают его качество, например повышая морозостойкость, сопротивляемость агрессивной среде.

Пластифицированный и гидрофобный портландцементы применяют наравне с обычным портландцементом для бетонных и железобетонных наземных, подземных и подводных конструкций, в том числе работающих в условиях циклического замораживания или увлажнения.

Белый и цветные портландцементы. Сырьем для заводского производства белого портландцемента служат чистые известняки и белые глины. Сырьевую смесь обжигают на беззольном (газовом) опливе. Для повышения белизны клинкер обжигают в восстановительной среде и отбеливают путем быстрого охлаждения водой. Белый цемент должен содержать Fe_2O_3 не более 0,35—0,5%. При помоле особенно тщательно предохраняют цемент от попадания в него частиц железа или оксидов железа, которые нарушают его белизну. По степени белизны белый портландцемент делится на три сорта: цемент 1-го сорта имеет коэффициент отражения не ниже 80%; 2-го сорта — не ниже 75% и 3-го сорта — не ниже 68%. Степень белизны определяют фотометром типа ФМ-58. За эталон принимают сернокислый барий BaSO_4 : он имеет коэффициент отражения не менее 95%. Следует отметить, что коэффициент отражения портландцемента обычного составляет 40%.

Цветные цементы получают путем совместного помола клинкера белого портландцемента со щелочестойкими и светостойкими пигментами. Пигментов добавляют не более 15% минеральных и не более 0,3% органических. Для получения цветных цементах желтого, розового, красного, коричневого, зеленого, голубого и черного цветов используют пигменты природные (охру, железный сурик и др.) и искусственные (оксид хрома, мумию, оксид марганца — пиролюзит).

По способу П.И. Боженова можно получать цветные клинкеры, добавляя к сырьевой смеси 0,05—0,1% соединений хрома, марганца, кобальта, никеля и др. При помоле таких клинкеров получают цветные цементы с более интенсивной окраской.

Белый и цветные портландцементы выпускают марок М 400 и М 500. Их применяют для архитектурно-отделочных работ, облицовочного слоя панелей и блоков, скульптурных работ, цветных разделительных полос на автомагистралях и т. п.

Портландцемент дорожный получают совместным помолом портландцементного клинкера, в котором повышенное содержание C_3S , но ограниченное C_3A — до 8%, а также гипса — до 3,5% по SO_3 . Пластифицирующих добавок при помоле добавляют не более 0,3%. Присутствие гранулированного доменного шлака допускается до 15% массы цемента. Выпускается этот цемент двух марок: 400 и 500. Начало схватывания не ранее 2 ч после затворения водой.

Дорожный портландцемент предназначен для устройства бетонных покрытий автомагистралей, придавая им повышенную морозостойкость, деформативность, прочность при изгибе и ударной нагрузке, а также низкие показатели истираемости и усадки.

Расширяющийся портландцемент (РПЦ) — гидравлическое вяжущее вещество, получаемое в процессе тонкого измельчения смеси, состоящей из портландцементного

клинкера (60%), глиноземистого клинкера или шлака (6%), доменного гранулированного шлака или другой активной минеральной добавки (25%) и гипса (9%). РПЦ характеризуется высокой плотностью, быстрым твердением при кратковременном пропаривании, водонепроницаемостью до 1,2 МПа и более, а также повышенной морозостойкостью цементного камня. Главным достоинством этого цемента служит способность цементного теста в начальный период твердения переходить в цементный камень с линейным расширением 0,3—0,4% при постоянном увлажнении (в течение трех суток).

Применяют РПЦ, как и другие цементы с аналогичным качеством, при заделке в целях гидроизоляции швов тубингов, раструбных труб, стыков и трещин в бетонных и железобетонных конструкциях, в производстве сборных бетонных изделий с сокращением времени их тепловой обработки.

Алинитовый цемент — одна из новых разновидностей быстротвердеющих портландцементов. В качестве сырьевых материалов для его производства применяют смесь известняка, глинистого компонента и добавки раствора хлористого кальция. Для получения клинкера сырьевую смесь обжигают при температуре 1050—1150°C вместо 1450—1500°C при получении клинкера портландцемента. Полученный клинкер измельчают совместно с добавкой двуводного гипса в количестве 2,5—3,5% массы цемента в расчете на SO_3 . Допускается введение 10—30% активных минеральных добавок или 30—50% доменного гранулированного шлака.

В составе клинкера преобладают минералы — алинит (хлорсиликат кальция), являющийся основным, поскольку его содержится 60—80% по массе, а также хлоралюминат кальция.

Активность алинитового цемента составляет 40—60 МПа. При производстве алинитового цемента обеспечивается по сравнению с портландцементом более низкий (на 15—20%) расход топлива при обжиге сырьевой смеси. Но имеются и недостатки: бетоны, приготовленные на алинитовом цементе, имеют пониженную морозостойкость, а стальная арматура в железобетоне на основе такого цемента корродирует под влиянием ионов хлора. Отрицательные явления в значительной мере устраняются различными мероприятиями.

Механоактивированный портландцемент начали выпускать на отдельных заводах по своеобразной технологии с целью улучшения его строительно-технических характеристик, а также увеличения его массы при сохранении исходной активности. В результате механо-химической активации повышается не только дисперсность материала, но и реакционная способность, выражаемая в приросте гидравлической активности на 30—40 МПа. Последнее означает возможную экономию до 70% цементного клинкера в связи с его заменой минеральными добавками, например горной кремнесодержащей породой, песком, золошлаковым отходом и др. Обычно реализуется одна из двух возможных технологических схем производства меха-ноактивированного портландцемента: по 1-му варианту --1т цемента марки 500, добавка с получением после активации 1—4 т золошлаковых отходов, песка или другого минерального вещества с выходом на конечной операции 2—5 т вяжущего вещества марки 300—500 и возможного получения широкой номенклатуры сухих смесей для строительных и отделочных работ; по 2-му варианту — 1 т цемента марки 500 с добавкой механохимической обработки вещества, с получением 1 т цемента марки 700—800, и, соответственно, качественно новых технических свойств цемента в бетонах и растворах, в том числе при получении искусственного литого камня (фундаментного, тротуарного, декоративного и др.).

Глиноземистый цемент и его разновидности. К клинкеросодержащим гидравлическим вяжущим веществам, кроме портландцемента и его разновидностей, относится и глиноземистый цемент со своими разновидностями. Однако для его получения требуется клинкер иной, а не портландцементный. Этот цемент является быстротвердеющим вяжущим веществом, набирающим через сутки твердения прочность, которая составляет свыше 85% его марочной прочности. Он получается обжигом до плавления, и тогда

сырьевая смесь в виде брикетов обжигается в электропечах или вагранках при температуре 1400—1500°C. Обжиг может быть до спекания, и тогда клинкер получают во вращающихся печах при температуре 1200—1300°C. За обжигом следует тонкий помол продукта обжига — сплава или клинкера. От других цементов глиноземистый отличается высоким, преобладающим содержанием в клинкере алюминатов кальция ($n\text{CaO} \cdot m\text{Al}_2\text{O}_3$).

К основным видам сырья для получения глиноземистого цемента относятся боксит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и известняк. Но боксит — сравнительно редко встречающаяся горная порода и, к тому же, весьма, ценная для получения металлического алюминия. Поэтому используют некоторые промышленные отходы, богатые глиноземом (Al_2O_3). В нашей стране разработан способ производства этого цемента путем плавки в доменной печи бокситовой железной руды с добавлением известняка или извести и металлической стружки или лома. В такой домне кроме чугуна получают шлак температурой 1550—1600°C, который и является глиноземистым клинкером, поступающим на помол его в цемент.

Глиноземистый цемент представлен следующими оксидами (%): Al_2O_3 — 55; CaO — 45; SiO_2 — 5—10; Fe_2O_3 — 5—15 (включая закись железа). Основным компонентом цемента является однокальциевый алюминат CA , который в дальнейшем при взаимодействии с водой характеризуется нормальным сроком схватывания (начало не менее 30 мин), высокой прочностью цементного камня в ранние сроки твердения. При повышенном содержании CaO возникает при обжиге C_5A_3 или C_{12}A_7 , а при пониженном — CA_2 . Чтобы не было уменьшения интенсивности нарастания прочности, стремятся ограничить содержание C_2S , поэтому должен быть минимальный предел содержания кремнезема в сырье. Не приносят пользу в сырье оксиды и закиси железа, скорее — наоборот. Вовсе нежелательно присутствие MgO и TiO_2 , так как, отнимая часть оксида алюминия и оксида кальция, они дают негидратирующиеся, т. е. балластные, соединения. По некоторым данным, до 3—5% $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ влияет на систему положительно.

Помол клинкера производят до очень высокой дисперсности цемента: больше 90% должно проходить сквозь сито № 008 с сеткой 5476 отв/см². Однако размалывается в порошок он труднее портланд-цементного клинкера, с большим расходом электроэнергии на работу мельницы.

Глиноземистый цемент выпускают трех марок: 400, 500 и 600, определенных в трехсуточном возрасте, но уже через одни сутки образцы набирают прочность при сжатии, соответственно, не менее 23, 28 и 33 МПа. Твердение цементного теста (и в изделиях) сопровождается выделением значительного количества теплоты (250—370 кДж/кг). Это хорошо при зимнем бетонировании, но в массивных сооружениях, особенно при работах в летнее время, могут возникать местные перегревы и неравномерное деформирование. Изделия на основе глиноземистого цемента при твердении нельзя нагревать (например, пропаривать), так как с повышением температуры бетона его прочность быстро падает (в 2—3 раза) в связи с образованием в цементном камне малопрочных соединений — так называемого кубического трехкальцевого гидроалюмината $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (C_3AH_6). Для устранения этого явления, по предложению П.П. Будникова, при помоле клинкера в мельницу добавляют природный или обожженный ангидрит CaSO_4 . Получаемый ангидрито-глиноземистый цемент быстро твердеет не только при нормальной температуре (15—20°C), но и при повышенной (30—40°C и выше), приобретая высокую прочность. Его целесообразно использовать при всех срочных строительных работах, особенно, если отвердевание конструкций происходит при повышенных температурах. При температурах же до 25—30°C весьма эффективен глиноземистый цемент, обеспечивается высокая прочность железобетонных изделий в начальные сроки твердения, повышенная морозостойкость, высокая коррозионная стойкость при воздействии сульфатных сред, морской воды. На основе глиноземистого цемента изготавливается расширяющийся водонепроницаемый цемент, жаростойкие растворы и бетоны. Однако следует отметить, что в связи с заметным истощением запасов высокосортных бокситов качество глиноземистого цемента нередко заметно снижается, в

частности, за счет повышенного содержания в них SiO_2 и других микропримесей с возможным образованием геленита. В последние годы появились работы, направленные на получение так называемого модифицированного глиноземистого цемента. Для его изготовления используют бокситы, загрязненные примесями, но в сырьевые смеси вводят полезные добавки, повышающие содержание химических новообразований. В результате новые модифицированные смеси оказались более благоприятными для поддержания улучшенного качества. В небольших размерах применяют добавки с гарантией высокого качества готовой продукции (из работ С.И. Иващенко).

Расширяющийся водонепроницаемый цемент получают способом тщательного перемешивания (или совместного помола) глиноземистого цемента (около 70%), гипса (около 20%) и молотого высокоосновного гидроалюмината кальция (примерно 10%). Он является бы-стросхватывающимся и быстротвердеющим гидравлическим вяжущим веществом. Важный его компонент — высокоосновный гидроалюминат кальция — изготавливают отдельно путем совместного помола смеси глиноземистого цемента и извести-пушонки, взятых в равных отношениях. Полученную смесь обрабатывают в гипсоварочном котле и высушивают. Готовый продукт C_4AH_{13} — требуемый компонент (10—11%) данного цемента.

Линейное расширение твердеющего цемента в состоянии теста нормальной густоты при воздушном хранении образцов составляет в возрасте 1 суток не менее 0,05%, в возрасте 28 суток — не менее 0,02%; то же при погружении образцов в воду: через 1 ч в возрасте 1 суток не менее 0,2%. Предел прочности при сжатии кубиков размером 20x20x20 мм цементного теста нормальной густоты через 3 суток — не менее 30, через 28 суток — не менее 50 МПа. Начало схватывания — не ранее 4 мин, конец — не позднее 15 мин от начала затворения теста. Эти сроки можно замедлять добавкой ССБ, буры и др. Данный цемент используют при восстановлении железобетонных конструкций, для гидроизоляции подземных сооружений, заделки трещин разного рода, зачеканки стыков водопроводных труб и т. п.

Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент (ГГРЦ) — гидравлическое быстротвердеющее вещество, получаемое совместным помолом высокоглиноземистого шлака с двуводным сернокислым кальцием (не более 30%). Гипсоглиноземистый расширяющийся цемент имеет начало схватывания не ранее 20 мин и конец схватывания не позднее 4 ч от начала затворения, что выгодно отличает его от водонепроницаемого расширяющегося цемента. При необходимости могут использоваться замедлители сроков схватывания — ССБ, бура, уксусная кислота и другие добавки. Линейное расширение твердеющего цемента в состоянии теста нормальной густоты составляет при водно-воздушном твердении не менее 0,1%, а при водном твердении — не менее 0,15% через одни сутки. Без влажности, т. е. на воздухе, этот цемент не расширяется и даже дает усадку. Предел прочности при сжатии через 1 сутки 35 МПа для марки 400 и 45 МПа для марки 500. Указанные марки соответствуют трехдневному возрасту этого цемента. Деформативная способность ГГРЦ несколько выше, чем у глиноземистого цемента. Он предназначен для получения безусадочных и расширяющихся водонепроницаемых бетонов, гидроизоляционных штукатурных растворов, для заделки стыков сборных бетонных и железобетонных конструкций, при бурении скважин и т. п. Обладает морозостойкостью, атмосфероустойчивостью в растворах и бетонах, изготавливаемых на его основе; нельзя применять его при работе конструкций при температурах выше 80°C, так как постепенно разрушается важный кристаллический компонент цементного камня — эттрингит, содержащий в себе много кристаллизационной воды.

Напрягающий цемент (НЦ) — быстросхватывающееся, быстротвердеющее, расширяющееся вяжущее вещество, получаемое тщательным смешением в определенной дозировке при совместном помоле силикатного, алюминатного и сульфатного компонентов. Силикатным компонентом (65—75%) служит портландцемент или его клинкер; алюминатным (18—20%) — глиноземистый цемент или его клинкер, в качестве

которого может быть и глиноземистый шлак; сульфатным компонентом (6—15%), в пересчете на 8O_3 , является строительный гипс или природный гипсовый камень.

Начало схватывания должно быть не ранее 2 мин и конец схватывания не ранее 6 мин. При использовании в качестве сульфатного компонента природного гипсового камня начало схватывания НЦ наступает не ранее 8 мин и конец — не менее 15 мин. С помощью добавок можно замедлить сроки схватывания. Удельная поверхность НЦ — не менее $3500\text{ см}^2/\text{г}$.

НЦ обладает способностью к значительному расширению (до 4%) при твердении в состоянии цементного теста нормальной густоты. В железобетоне НЦ создает после отвердевания в арматуре (независимо от ее расположения) предварительное напряжение. Этим свойством как функцией химической энергии цемента пользуются при изготовлении предварительно напряженных железобетонных конструкций вместо более сложного механического или термического напряжения арматуры. С учетом величины достигаемой энергии самонапряжения, т. е. удельного давления в МПа, развиваемого при твердении НЦ в условиях ограничения свободного расширения, выделяют его разновидности НЦ-2, НЦ-4 и НЦ-6. Напрягающий цемент отличается также повышенными показателями водо- и газонепроницаемости, морозостойкости, прочности при растяжении и изгибе. Марки цемента — 400 и 500; определяются испытанием образцов-балочек из цементно-песчаного раствора 1:1 в возрасте 28 суток.

Напрягающий цемент применяют для изготовления конструкций из самонапряженного железобетона, а также для гидроизоляции шахт, подвалов, зачеканки швов, в спортивных сооружениях, подземных гаражах, полах общественных и производственных зданий и других объектах.

9.1.5. СМЕШАННЫЕ ЦЕМЕНТЫ КАК РАЗНОВИДНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

К неорганическим смешанным относятся вяжущие вещества, получаемые объединением воздушных и гидравлических вяжущих с активными минеральными добавками и шлаками при их совместном помоле или после раздельного измельчения.

Активными минеральными добавками называются природные или искусственные вещества, которые при смешении в тонкоизмельченном виде с воздушной известью переводят ее в вяжущее вещество с гидравлическими свойствами, а при смешении с портландцементом усиливают ее гидравлические свойства и повышают водостойкость смешанного вяжущего вещества. Применение этих добавок также экономически целесообразно — снижается стоимость портландцемента за счет экономии клинкера.

Среди природных активных минеральных добавок вулканического происхождения широкое применение получили пуццоланы, туфы, пемзы и трассы, а из осадочных горных пород — диатомиты, трепелы, опоки. Характерным для добавок из осадочных горных пород является наличие в них преобладающего количества кремнеземистых компонентов, находящихся в аморфном состоянии, а для добавок вулканического происхождения — аморфных алюмосиликатов.

К искусственным активным минеральным (гидравлическим) добавкам относятся: шлаки доменные гранулированные, топливные золы и шлаки, обожженные глины (глиежи, цемянки), побочные продукты и отходы производств, например нефелиновый (белитовый) шлам — отход глиноземного производства; сиштоф — отход при производстве сернокислого алюминия и квасцов и др. Некоторые из упомянутых искусственных активных добавок по химическому составу близки к составу вяжущего вещества и поэтому количество таких добавок нередко бывает доминирующим. Именно к таким компонентам смешанных вяжущих веществ относится гранулированный доменный шлак, химический состав которого весьма сходен с составом портландцементного клинкера, а именно (%): CaO — 30—50, SiO_2 — 28—30, Al_2O_3 — 8—24, MgO — 1—12 и др. Весьма близок по минеральному составу нефелиновый шлам к белитовому портландцементу: в шламе до 80% по массе содержится двухкальциевого силиката $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (белита). Это в полной мере, как уже отмечалось, относится к шлаку бокситовой руды при доменной плавке этого природного материала (в присутствии некоторых добавок). Количество примеров можно увеличить, но общий вывод один: необходимо проявлять максимальное внимание к побочным продуктам и отходам производства.

Портландцемент пуццолановый — гидравлическое вяжущее вещество, получаемое совместным тонким измельчением портландцементного клинкера, гипса (2—3% в пересчете на серный ангидрит) и минеральной добавки, или тщательным смешиванием тех же раздельно измельченных материалов. Количество активных минеральных добавок составляет (% по массе цемента): добавок вулканического происхождения — не менее 25, обожженной глины, глиежа или топливной золы — 25—40, добавок осадочного происхождения — 20—30. В клинкере для производства пуццоланового портландцемента ограничивают содержание трехкальциевого алюмината до 8%. Гипс вводят для регулирования сроков схватывания.

Производство пуццоланового портландцемента отличается наличием дополнительных операций по измельчению минеральной добавки до частиц не крупнее 5 мм и сушке с последующим хранением ее в отдельном бункере. Подготовленная и отдозированная добавка поступает в мельницу совместного помола с клинкером и гипсом. Для интенсификации помола иногда вводят дополнительные добавки (в количестве до 1%), не ухудшающие качества цемента.

Качество пуццоланового портландцемента обуславливают клинкерные минералы. Минеральные добавки улучшают отдельные свойства, особенно при взаимодействии цемента с водой. Они химически связывают часть образующегося гидроксида кальция в

нерастворимых соединениях, повышая плотность и сульфатостойкость цементного камня. Этот цемент отнесен по стандарту к группе сульфатостойких. Его плотность 2,7—2,9 г/см³, насыпная плотность в рыхлом состоянии 800—1000 кг/м³, а в уплотненном — 1200—1500 кг/м³. Цвет светлый. Для образования теста нормальной густоты требуется повышенное количество воды по сравнению с портландцементом — 30—38%, особенно при рыхлых мягких добавках — трепеле и диатомите. Это относится к его недостаткам, особенно в связи с увеличением размеров усадки. Сроки схватывания: начало не ранее 45 мин, конец — не позднее 10 ч. Пуццолановый портландцемент имеет марки 300 и 400. Твердеет в замедленном темпе, но через 3—6 мес. его прочность полностью соответствует прочности портландцемента той же марки. Такой характер отвердевания объясняется наличием дополнительных реакций с минеральными добавками в условиях повышенного содержания воды.

Пуццолановый портландцемент используют для сооружения бетонных и железобетонных конструкций подводных и подземных сооружений, подверженных действию мягких и сульфатных вод, повышенной влажности. Бетоны на его основе более водонепроницаемые, чем на обычном портландцементе. Однако исследования показали, что некоторые активные глиноземсодержащие добавки могут снизить сульфатостойкость этих цемента. Поэтому был разработан специальный — сульфатостойкий пуццолановый портландцемент.

Сульфатостойкий пуццолановый портландцемент изготавливают из клинкера нормированного минералогического состава и гипса (до 3,5% по SO₃). В клинкере содержатся (%): C₃S до 50, C₃A до 5, (C₃A + C₄AF) — не более 22. Минеральные активные добавки для этого цемента не применяются, так как они снижают морозостойкость бетона. Пуццолановый сульфатостойкий портландцемент при твердении мало выделяет теплоты, отличается замедленным твердением в начальные сроки. Его марка по прочности — 400, цементный камень имеет повышенную морозостойкость и устойчивость к сульфатной среде. Используется для изготовления бетонных и железобетонных конструкций, гидротехнических сооружений, работающих в условиях сульфатной коррозии, попеременного увлажнения и высыхания, циклического замерзания и оттаивания. Для твердения этого вяжущего более благоприятны увлажненные условия или водная среда.

Шлакопортландцемент — гидравлическое вяжущее вещество, получаемое совместным измельчением портландцементного клинкера, доменного гранулированного или электротермофосфорного шлака в количестве не менее 21 и не более 80% и гипса — не свыше 3,5% (в пересчете на SO₃) для регулирования сроков схватывания и активизации шлака на стадии твердения цементного теста. Допускается заменять часть шлака активными минеральными добавками (не более 10%). Можно изготавливать Шлакопортландцемент и путем смешения тех же исходных материалов, но измельченных отдельно. Грануляция шлака осуществляется на специальных грануляционных установках быстрым охлаждением расплава шлака водой. По химическому составу доменный шлак состоит в основном (на 90—95%) из оксидов Ca, Si, Al, т. е. близок к составу портландцементного клинкера, поэтому его и вводят в большем количестве, чем другие активные минеральные добавки. Расход известняка при получении клинкера можно снизить, добавляя в сырьевую смесь вместо глинистого компонента часть шлака.

Технология этого цемента включает два передела: получение портландцементного клинкера; получение шлакопортландцемента. Первый передел остается тем же, что и в производстве портландцемента, второй — начинается с поступления сухого шлака, портландцементного клинкера и гипса в бункер помольного отделения. Отдозированные компоненты поступают в трубные мельницы для совместного помола. Готовый продукт — шлакопортландцемент — направляется в сил осы для хранения или потребителю. При помоле практикуется и двухступенчатый цикл: сначала измельчают более твердый клинкер совместно с гипсом, а затем добавляют менее твердый шлак, что создает возможность более тонкого измельчения клинкера, а затем и шлакопортландцемента,

например, до удельной поверхности, равной 4000—4500 см²/г, как у быстротвердеющего шлакопортландцемента.

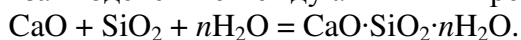
Этот продукт выпускают марок 300, 400 и 500. Он сероватого цвета с голубоватым оттенком. Плотность — 2,8—3,0 г/см³, средняя плотность в рыхлом состоянии 1000—1300, а в уплотненном — 1400—1800 кг/м³; нормальная густота цементного теста 26—30%; тонкость помола и равномерность изменения объема такие же, как у обычного портландцемента. Прочность цементного теста нарастает замедленно в начальный период твердения, но через 3—6 месяцев она превосходит прочность портландцемента той же марки.

Разновидностью шлакопортландцемента является быстротвердеющий, который отличается меньшим содержанием шлака (до 50%), более высокой тонкостью помола, наличием каталитических добавок (AlCO₃, FeCl₃, NaCl и др.) в количестве 0,5—1,5% массы цемента. Этот цемент характеризуется более интенсивным нарастанием прочности в начальный период твердения теста, например через 3 суток предел прочности при сжатии не менее 14 МПа, а через 28 суток — 40 МПа. Его следует употреблять в течение 7—10 дней со дня изготовления, чтобы он не потерял активность при хранении.

Шлакопортландцемент применяют для изготовления железобетонных изделий и конструкций, твердеющих в пропарочных камерах, в конструкциях горячих цехов, гидротехнических сооружениях, подвергающихся сульфатной агрессии.

К смешанным вяжущим на основе воздушных вяжущих веществ относятся следующие.

Известково-пуццолановое вяжущее вещество, которое получают совместным помолом 15—30% воздушной извести с активными минеральными добавками. В этот состав вводят до 5% двуводного гипса. При затворении такого вяжущего водой происходит химическое взаимодействие между активным кремнеземом и известью:



Образующийся низкоосновный гидросиликат кальция обеспечивает гидравлические свойства вяжущего. Марки его М25, М50, М100 и М150.

Известково-пуццолановое вяжущее вещество применяют в строительных растворах и бетонах низких марок для подводных и подземных сооружений, а также в изделиях с тепловлажностной обработкой.

Известково-шлаковое вяжущее вещество получают совместным помолом доменных гранулированных шлаков с воздушной гашеной или негашеной известью (20—30%) и гипсом (до 3—5%). В присутствии воды известь реагирует с низкоосновными алюминатами и силикатами шлака, переводя их в высокоосновные гидроалюминаты и гидросиликаты кальция, а гипс обеспечивает образование кристаллов этtringита.

Марки известково-шлакового вяжущего М50, М100, М150 и М200. Прочность повышается при использовании основных шлаков ($M_0 > 1$). При применении высококачественных шлаков, извести-кипелки и при более тонком помоле известково-шлаковое вяжущее вещество может иметь марки М250 и М300. Его применение то же, что и известково-пуццоланового вяжущего вещества.

Известково-кремнеземистое вяжущее вещество, получаемое в условиях автоклава, представляет собой продукт синтеза химически активного сырья с образованием гидросиликатов цементирующей связки в искусственных силикатных конгломератах. Одним из наиболее часто используемых компонентов сырьевой смеси служит известь. Она обладает большой химической активностью к кремнезему при термовлажностной обработке. Поэтому вторым основным компонентом сырьевой смеси является кварцевый песок или другие минеральные вещества, содержащие кремнезем, например кварцит или другие кислые породы, кислые шлаки, золы. Чтобы химическое взаимодействие проходило интенсивнее (со сбережением тепловой энергии и топлива), кремнеземистый компонент подвергают тонкому измельчению. Непременным третьим химически активным компонентом сырьевой смеси служит вода.

В настоящее время к самой распространенной составляющей автоклавных известково-кремнеземистых вяжущих веществ относят кальцевую известь. ГОСТ 9179—77 установлено, чтобы $\text{CaO} + \text{MgO}$ было больше 70%, в том числе MgO не более 5%; CO_2 — меньше 8%, время гашения не более 20 мин. В природе чаще встречаются мергелистые и доломитизированные известняки, и поэтому проблема использования магнезиальной извести, получаемой обжигом таких известняков, остается весьма актуальной. Присутствие MgO свыше 5% приводит к запоздалому гашению этого оксида (периклаза) с образованием $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и появлению трещин в силикатных изделиях.

При автоклавной обработке образуются наиболее устойчивые низкоосновные гидросиликаты с соотношением $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ в пределах 0,8—1,2, хотя на промежуточных стадиях отвердевания возможны и более высокоосновные химические соединения.

В формировании структуры и свойств силикатного камня как цементирующей связки на основе известково-кремнеземистого вяжущего вещества большую пользу приносят добавочные компоненты (добавки), выполняющие функции ускорителей процессов химического становления гидросиликатов кальция и магния. В результате синтеза с образованием тонкоигольчатых чешуйчатых $\text{CSH}(\text{B})$ и тоберморита ($\text{C}_3\text{S}_6\text{H}_5$) происходит общая кристаллизация новообразований и формирование микроструктуры камня. В высокоизвестковых смесях синтезируются также гиллебрандит C_2SH и другие комплексные соединения.

Активность вяжущего вещества, выражаемая прочностью известково-кремнеземистого камня оптимальной структуры после автоклавной обработки, как и другие структурно-чувствительные свойства, зависит от соотношения $\text{И}_\text{т}:\text{П}_\text{м}$ (по массе), где $\text{И}_\text{т}$ — известковое тесто как дисперсионная среда, $\text{П}_\text{м}$ — песок молотый как кремнеземистый компонент и как дисперсная фаза в этой гетерогенной системе. Исследования показали, что пределы прочности при сжатии, на растяжение, при изгибе и другие свойства силикатного камня принимают экстремальные значения, когда это соотношение является минимальной величиной при принятых технологических параметрах, что соответствует закону створа. Получаемая величина активности вяжущего не предусмотрена стандартной оценкой, но служит расчетной, необходимой для определения прочности ИСК на его основе. К таким конгломератам относятся плотные силикатные бетоны, железобетон, из ячеистых бетонов — газосиликат, пеносиликат, а также силикатный кирпич и другие изделия автоклавного твердения.

Сульфатно-шлаковые вяжущие вещества получают при активизации доменного гранулированного шлака двуводным и полуводным гипсом и ангидридом с добавкой оксидов кальция и магния в виде обожженного доломита, извести или портландцемента. Существуют две их разновидности: гипсошлаковое и шлаковое бесклинкерное. Чаще применяют гипсошлаковое, как сильно гидравлическое вяжущее вещество. Оно состоит из 75—85% доменного гранулированного шлака, 15—20% двуводного гипса или ангидрита, до 5% портландцементного клинкера (можно заменить 2% оксида кальция). Используют шлаки с повышенным содержанием глинозема (15—20%). Это — медленно твердеющее вещество марок М150, М200 и М300. Наряду с обычным применением в бетонных и железобетонных наземных конструкциях его целесообразно применять для подводных частей сооружений, работающих в условиях сульфатной агрессии. Шлаковое бесклинкерное вяжущее называют так вследствие очень малого содержания в нем активизирующей добавки, состоящей из 5—8% ангидрита и 5—8% обожженного доломита; остальная масса — доменный гранулированный шлак в количестве 85—90%.

*Гипсоцементнопуццолановое вяжущее вещество (ГЦПВ)*¹ получают смешением 50—75% полуводного гипса, 15—25% портландцемента и 10—25% активной минеральной добавки в виде диатомита, трепела, опоки и др. Обычно не рекомендуется смешивать портландцемент с большим количеством гипса, так как образующиеся высокосульфатные виды

¹ Предложено А.В. Волженским и А.В. Ферронской.

гидросульфоалюминатов кальция при кристаллизации значительно и неравномерно увеличиваются в объеме и могут вызвать трещины в затвердевшем конгломерате. Но при введении активной минеральной добавки, связывающей часть свободной извести в гидросиликаты кальция, образуются низкоосновные гидросульфоалюминаты без значительного увеличения в объеме, что обеспечивает трещиностойкость изделий из ГЦПВ.

Предел прочности при сжатии этого вяжущего вещества, полученного на обычном строительном гипсе, составляет 10—15 МПа, а на высокопрочном — 30—40 МПа. Конец схватывания наступает не позднее 20 мин, что удобно для производства.

ГЦПВ применяют для изготовления стеновых панелей, а также санитарно-технических кабин и других конструкций.

Шлакощелочные цементы представляют собой гидравлические вяжущие вещества, получаемые тонким измельчением гранулированного шлака совместно с малогигроскопичным щелочным компонентом или затворением молотого шлака растворами соединений щелочных металлов: натрия, калия или лития. Шлаки используют доменные или электротермофосфорные гранулированные (ГОСТ 3476—74) с тонкостью помола, характеризуемой удельной поверхностью не ниже 3000 см²/г. Могут быть использованы и другие разновидности шлаков, например титанистые, никелевые, ферромарганцевые, ваграночные, мартеновские после их предварительного испытания. Щелочные компоненты в виде соединений щелочных металлов составляют 5—15% массы шлака (в пересчете на сухое вещество). Используют их водные растворы 18—40%-ной концентрации по массе. К таким соединениям относятся: едкие щелочи (едкий натр, едкое кали), смесь плавленных щелочей; сода кальцинированная техническая, содощелочной шлак, поташ, фтористый натрий; силикатные соли и растворимые стекла с силикатным модулем 0,5—2,5, в том числе орто-мета-дисиликаты натрия и калия; алюминатные соли — алюминаты натрия и калия. Присутствие в шлакощелочных цементах значительных количеств щелочных соединений благоприятствует формированию в продуктах гидратации водостойких щелочных гидроалюмосиликатных новообразований типа $R_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot nH_2O$ или $R_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-4)SiO_2 \cdot nH_2O$.

Наиболее высокую гидравлическость имеют шлакощелочные цементы, затворенные растворами едких щелочей, а активность их выше при твердении в воде. В зависимости от состава алюмосиликатной составляющей эти цементы имеют несколько разновидностей: бездобавочный цемент, цемент с добавками горной породы, глинистых минералов, горелых пород, щелоче- и кремнийсодержащих веществ, карбонатов и др. Шлакощелочные цементы разделяются на марки: 400, 500, 600, 700, 800, 900 и 1000. При испытании в тесте нормальной густоты прочность цементов изменяется в пределах 60—180 МПа. При испытании в растворе состава 1:3 некоторые шлакощелочные цементы превышают в 1,5—2 раза прочность высокомарочного портландцемента. Шлакощелочные цементы на жидком стекле отличаются особо быстрым набором прочности: до 20—25 МПа в суточном возрасте. При использовании в качестве добавки каолина в количестве 20—50% получают декоративные шлакощелочные цементы с введением в их состав красящих минеральных веществ. К этим щелочестойким пигментам относятся железный сурик, оксид хрома, охра и др., добавляемые в количестве до 15% (по массе), или органические пигменты, например фталоцианино-вые, — до 0,3%. Кроме каолина, белизны цементов можно достичь добавлением известняка или доломита, если их коэффициенты белизны составляют не менее 90% по отношению к белизне $BaSO_4$.

Шлакощелочные цементы используют для монолитных и сборных бетонов и железобетона в жилищном, гидротехническом и автодорожном строительстве. Первый в мире жилой дом из монолитного шлакощелочного бетона построен в г. Липецке в 1987—88 гг.

9.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОДЫ ИЛИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ С НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ И ПРОЦЕССЫ ТВЕРДЕНИЯ

Неорганические вяжущие вещества, как отмечалось, используют в производстве различных ИСК. Среди них — тяжелые, легкие и ячеистые бетоны, строительные растворы, силикатные бетоны и многое другое. Находясь сначала в вязкопластичном состоянии в виде теста, неорганические вяжущие вещества быстро или постепенно отвердевают, цементируя заполняющие компоненты уплотненной конгломератной смеси с образованием камневидного монолитного изделия. Процессы отвердевания обусловлены химической кинетикой, т.е. скоростью гомогенных и гетерогенных реакций, продолжительностью этапов диспергирования и конденсации, изложенных выше в общей теории отвердевания ИСК (см. 2.2.5). Обычно характер процессов отвердевания усложнен полиминеральным составом вяжущего вещества, непрерывным изменением концентраций реагирующих соединений в соответствии с законом действия масс.

Для каждой разновидности вяжущего вещества имеются свои специфические особенности взаимодействия воды с вяжущим, связанные с их составом, — химическим, минералогическим, гранулометрическим и т. д., что привело к ряду теорий твердения, помогающих в решении практических задач химической технологии. Среди наиболее известных: теория Ле-Шателье о кристаллизации из растворов; теория Михаэлиса о преимущественном коллоидальном состоянии твердеющих веществ; теория А.А. Байкова, в которой как бы обобщаются эти две теории с изложением новых представлений о твердении — через образование коллоидов и кристаллогидратов. Эти теории получили дальнейшее развитие в работах Е.А. Шейкина, В.Б. Ратинова и др.

Характер процессов взаимодействия с жидкой средой обусловлен тем, что неорганические вяжущие вещества, во-первых, находятся в высокодисперсном состоянии, и, во-вторых, основным типом связи в их молекулах является ионный. Вследствие этого мельчайшие твердые частицы вяжущих веществ преимущественно состоят из ионных кристаллических решеток с высокой суммарной энергией связи. Вместе с тем сохраняется характерная для ионной связи способность к электростатическому взаимодействию с другими ионами; сохраняется качественный признак ионной связи: она не обладает свойством насыщаемости, что определяет способность молекул ионных соединений к агрегации.

Согласно общей теории отвердевания ИСК характерно наличие двух стадий. На первой стадии исходное высокодисперсное неорганическое вяжущее вещество переходит в качественно измененную, метастабильную систему. На второй стадии эта система переходит в относительно устойчивое камневидное вещество. По сравнению с исходным вяжущим веществом в состав нового, камневидного вещества входит до 60% и более новообразований и меньшая часть исходного вещества, не успевшего претерпеть деструкционных изменений. Эти две стадии не изолированы между собой, а накладываются одна на другую без четкой границы раздела.

Первая стадия начинается с момента объединения неорганического вяжущего вещества с жидкой средой и образования суспензии или пасты определенной концентрации. В возникшей гетерогенной системе немедленно начинаются и протекают деструкционные процессы с неполным или полным разрушением самих частиц вяжущего вещества и переходом их в водный раствор. Переход твердой фазы в раствор является значимым на этой стадии и может быть зафиксирован индикаторами (лакмусом, фенолфталеином и др.), так как чаще всего водная среда не остается нейтральной, что подтверждается возрастанием водородного показателя pH. Этот переход в другое агрегатное состояние происходит не одновременно в отношении всех твердых частиц вяжущего вещества вследствие их различной дисперсности и растворимости, поэтому процесс усложнен протеканием как растворения, так и формирования в суспензии (пасте) уже новых, твердых фаз. При растворении происходит, во-первых, распад растворяемого вещества до

размеров молекул с последующим молекулярным взаимодействием и изменением молекулярной структуры раствора; во-вторых, протекают определенные химические процессы. Наиболее типичным выражением последних является ионная реакция, поскольку ей предшествует расщепление молекул вяжущего вещества на положительные и отрицательные ионы.

Неорганические вяжущие вещества обладают неодинаковой растворимостью. Среди них группа труднорастворимых вяжущих с содержанием силикатов, алюмосиликатов или других оксисолей моно-и поликремниевых кислот. Их молекулы содержат комплексные анионы и активные положительно заряженные ионы Ca^{2+} , Al^{3+} и др.; при их взаимодействии возникают устойчивые соединения. Кроме того, твердые частицы этих вяжущих неоднородны по фазовому составу и представлены агрегатами средних солей с разной степенью их растворимости. Другая группа — более однородные вяжущие вещества по своему химическому составу. Она представлена основными оксидами, которые обладают большей растворимостью в водной среде, чем труднорастворимые оксисоли. Растворение не протекает мгновенно, а начинается в суспензиях или пастах с поверхности твердых частиц. С увеличением степени дисперсности частиц вяжущего растворение ускоряется и облегчается.

Поскольку при растворении происходят не только агрегатные превращения (т. е. твердое вещество переходит в жидкое состояние), но и химическое взаимодействие растворенных веществ с растворителем, то общий процесс растворения обычно сопровождается выделением тепловой энергии. Рост температуры благоприятствует, как правило, увеличению скорости растворения, хотя известны некоторые вяжущие вещества, например полуводный сульфат кальция, у которых с повышением температуры растворимость в водной среде понижается. Деструкции твердых частиц вяжущего вещества при растворении благоприятствует также высокая диэлектрическая проницаемость воды, вследствие которой резко ослабляется (почти в 80 раз¹) притяжение между разноименными электрическими зарядами, т. е. сильно уменьшается связь между ионами. Поэтому молекулы даже труднорастворимых солей неорганических вяжущих веществ в присутствии воды сравнительно легко расщепляются на ионы (диссоциируют). Вяжущие вещества типа оксисолей диссоциируют на ионы металла и ионы кислотных остатков, а вяжущие вещества — основания, которые возникают вследствие реакции основных оксидов с водой, диссоциируют на ионы металла и гидроксильные ионы OH^- . Так, минералы портландцементного клинкера — алит Ca_3SiO_5 и белит — Ca_2SiO_4 — при растворении в воде диссоциируют на ионы кальция и силикатные ионы; трехкальциевый алюминат $\text{Ca}_3(\text{AlO}_3)_2$ — на ионы кальция и алюминатные ионы; четырехкальциевый алюмоферрит $\text{Ca}_3(\text{AlO}_3)_2 \cdot \text{Ca}(\text{FeO}_2)_2$ — на кальций-ионы, алюминатные и ферритные ионы. Молекулы воды с поверхности кристалла соли вытягивают в первую очередь положительно заряженные ионы, что ускоряет выпадение из ионной (координационной) решетки отрицательно заряженных ионов, т. е. происходит распад системы ионов на составляющие. Аналогичные распады систем в водной среде происходят при использовании других вяжущих — гипсовых, магнезиальных, глиноземистого цемента и других, в основе строения микроструктуры которых находятся ионные кристаллические решетки. Характерным отличием шлако-щелочных цементов от других, например кальциевых, соединений является их несравненно большая растворимость. В условиях образовавшегося щелочного раствора проходит самопроизвольное диспергирование частиц шлака. Продуктами деструкции алюмосиликатной составляющей шлака

¹ Согласно закону Кулона: $F = \frac{e_1 \cdot e_2}{\varepsilon \cdot r^2}$, где F — сила взаимодействия между зарядами e_1 и e_2 ; r —

расстояние между центрами ионов; ε — диэлектрическая проницаемость растворителя (для воды при 20°C величина $\varepsilon = 80$).

становятся частицы $(\text{SiO}_4)^{4+}$ и $(\text{AlO}_4)^{3-}$ и ионы Ca^{2+} , $\text{Ca}(\text{OH})_+$ или $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})\cdot(\text{OH})^-$. Такой процесс деструкции происходит за счет интенсификации разрыхления щелочью алюмокремниевых ингредиентов шлака: $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}+\text{OH}=\text{Si}-\text{OH}+\text{Si}+\text{O}^-$.

Таким образом на первой стадии происходит разрушение молекулярной структуры частиц твердых веществ, разупорядочение движения молекул, распад систем ионов, деструкция дисперсий (например, шлаковых в щелочной среде).

Деструкция вяжущего вещества, как отмечалось выше, продолжается в течение длительного периода времени, что зависит от размера частиц, концентрации твердой фазы в жидкой среде, температуры, значения pH среды, давления и других факторов. Чем сложнее твердые частицы вяжущего вещества по своему агрегативному составу, тем более сложными являются процессы деструкции с переходом системы в метастабильное состояние с резким увеличением дисперсной фазы в единице ее объема.

Вторая стадия процесса отвердевания вяжущих веществ выражается в упорядочении частично или полностью разрушенной системы, с переходом ее из жидкого состояния в другое, более агрегатно-устойчивое — твердое состояние. Основным сложным механизмом перехода из метастабильного состояния раствора в упорядоченное являются ассоциации молекул, ионные реакции, кристаллизация как в процессе химических реакций, так и через пересыщение раствора.

Находящиеся в растворе пары ионов соединяются в молекулы, которые оказываются достаточно устойчивыми к диссоциации. Гомогенные и гетерогенные реакции становятся необратимыми с образованием новых, сравнительно стабильных соединений (твердых веществ). Часть новых образующихся соединений нерастворима в воде, ассоциации их молекул соединяются в более крупные скопления и выпадают в кристаллический или аморфный осадок. При благоприятных условиях выпадение нерастворимого осадка может продолжаться до тех пор, пока не израсходуются все взаимодействующие между собой ионы. Кроме нерастворимых химических новообразований, в результате ионных реакций могут выделяться растворимые соли или основания, и тогда они накапливаются в растворе до стадии насыщения.

Кристаллы и кристаллогидраты выделяются не только в результате химических реакций, но и в связи с пересыщением растворов, в которых они становятся менее растворимыми, чем исходные вяжущие вещества. Сначала в растворе выделяются микрочастицы, которые в последующий период самопроизвольно укрупняются до размеров кристалликов. Одновременно могут действовать и другие факторы, способствующие кристаллизации из пересыщенных растворов: испарение воды, присутствие добавок — понизителей растворимости, понижение температуры и т. п. Они благоприятствуют переходу жидкой метастабильной системы в более устойчивые кристаллические и относительно устойчивые (гелеобразные) фазы. Образование кристаллов из ионов, атомов или молекул всегда сопровождается выделением энергии кристаллических решеток. От ее суммарной величины зависят упругость формирующихся твердых кристаллов и агрегатов, а также прочность, твердость, растворимость и другие свойства. Та часть веществ, которая не успевает перейти в стабильное кристаллическое состояние и остается в виде гелевой фазы, обладает большой внутренней энергией и меньшей устойчивостью структуры.

По этой кинетической схеме твердеют портландцемент, глиноземистый цемент, гипсовые и другие неорганические вяжущие вещества. Процессы их отвердевания в результате взаимодействия с водой определяют обычно как гидролиз, т. е. как реакцию обменного разложения водой, и как гидратацию, т. е. взаимодействие ионов с полярными молекулами воды, с появлением новых гидратных соединений.

При твердении портландцемента (клинкерной его части) алит вследствие гидролиза выделяет два гидратных соединения — кислую соль и основание, а именно: $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 5\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}_2\text{H}_8\text{SiO}_8 + \text{Ca}(\text{OH})_2$; в растворе, кроме того, накапливаются гидроксильные ионы OH^- .

Белит, имеющий сравнительно малую внутреннюю энергию и отличающийся поэтому слабой диссоциацией молекул в водной среде, в результате присоединения нескольких молекул воды образует $\text{Ca}_2\text{H}_8\text{SiO}_8$.

Трехкальциевый алюминат ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) в процессе взаимодействия с водой образует осадок в виде кубических кристаллов кислой соли $\text{Ca}_3\text{H}_{12}\text{Al}_2\text{O}_{12}$. Это новообразование имеет обратимый характер, так как может сравнительно легко растворяться с расщеплением молекул кислой соли на отдельные ионы и с выделением больших количеств теплоты (по сравнению с теплотой, выделяемой при диссоциации других минералов клинкера).

Гидратные новообразования возникают и при взаимодействии четвертого компонента клинкера — четырехкальциевого алюмо-феррита ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$) с водой. Под влиянием гидролиза образуются кислые соли $\text{Ca}_3\text{H}_{12}\text{Al}_2\text{O}_{12} \cdot \text{CaH}_2\text{Fe}_2\text{O}_3$. В среде со значительным содержанием в ней основания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ кислая соль (однокальциевый гидроферрит $\text{CaH}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) вступает в химическую реакцию: $\text{CaH}_2\text{Fe}_2\text{O}_5 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 10\text{H}_2\text{O}$ с образованием нового гидратного соединения $\text{Ca}_4\text{H}_{28}\text{Fe}_2\text{O}_{21}$.

Присутствующий в водной среде сульфат кальция ($\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$), добавлявшийся в виде гипса при помоле портландцементного клинкера, участвует в формировании комплексного соединения — гид-росульфалюмината кальция (этtringита), имеющего ярко выраженную форму крупных кристаллогидратов. Более удобной и общепринятой формулой записи состава этtringита является: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$.

В результате процесса гидролиза и гидратации портландцементного клинкера в системе формируются новые кристаллические, а также аморфизированные гидратные фазы. Особенно широко представлены в системе гидросиликаты кальция. Их высокодисперсные субмикрорекристаллы волокнистой формы размером менее $1 \cdot 10^{-8}$ м в ранние и до $1 \cdot 10^{-7}$ м в более поздние сроки твердения составляют гелевую часть отвердевшего вяжущего вещества цементного камня. Только относительно крупные микрорекристаллы гидрооксида кальция, гидроалюминатов и этtringита достигают значительных размеров (более 0,5 мкм). Их можно наблюдать в микроскопе (с увеличением до 2000), тогда как частицы гидросиликатов обнаруживаются лишь с помощью электронного микроскопа и рентгеноструктурного анализа.

Таким образом, к завершающему этапу второй стадии твердения портландцементного теста формируется кристаллическая (сросшиеся между собой кристаллогидраты) и гелевая части цементного камня. Последний обладает определенной микроструктурой, составом и свойствами. Сrostки кристаллогидратов в этой формирующейся микроструктуре образуют либо непрерывную пространственную сетку как остов цементного камня, либо они более или менее равномерно распределены в гелевой части. Гидросиликаты занимают в ней примерно 70—75% общего объема. Кроме того, она имеет тончайшие гелевые поры диаметром $(15—30) \cdot 10^{-10}$ м, контракционные — от 0,01 до 0,1 мкм, возникшие вследствие усадки при образовании новых химических соединений, капиллярные — размером от 0,1—0,5 до 50 мкм и более, оставшиеся от испарения свободной воды, физических усадочных явлений.

В сформировавшемся цементном камне, даже после большого срока его твердения, сохраняются не полностью гидратированные частицы клинкера, рассредоточенные среди гидратных новообразований. Нормальному процессу электролитической диссоциации этих частиц клинкера могли помешать более крупный размер частиц, ограниченное количество воды, введенной в тесто: чем меньше жидкой среды, тем труднее проходит диссоциация; экранирующие твердые оболочки из новообразований, осадившихся на поверхности частиц цемента, что затруднило диффузию воды к новым поверхностям частиц цемента, и т. п.

В упрочнении цементного камня с уплотнением его пор может участвовать углекислый газ: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Образующаяся соль углекислого кальция практически нерастворима в воде, а ее кристаллы заполняют поры, особенно в поверхностных слоях

цементного камня, так как в процессе карбонизации объем твердой фазы увеличивается на 10—11%.

Под влиянием процессов отвердевания цементного теста на второй стадии исходное количество воды уменьшается, тогда как масса твердой фазы возрастает за счет гидратных новообразований. Часть воды переходит в кристаллизационную, другая — в цеолитную, а некоторая доля воды находится в свободном (объемном) и пленочном состояниях.

Аналогичные явления обменных реакций с образованием новых гидратных соединений происходят также при взаимодействии с водой или водным раствором соли других неорганических веществ. Схема процессов на второй стадии их отвердевания остается прежней: формирование кристаллогидратов в условиях насыщенных растворов с выделением: *при глиноземистом цементе* — $\text{Ca}_3\text{H}_{12}\text{Al}_2\text{O}_{12}$, чему всегда способствует повышенный водородный показатель среды pH; *при известии* — $\text{Ca}(\text{OH})_2$; *при гипсовых вяжущих веществах* — $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; *при магниевых вяжущих веществах* — $3\text{MgO} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. При шлакощелочном цементе вещественный и количественный состав продуктов кристаллизации определяется в основном минералогическим и химическим составом шлаков, природой щелочного компонента, условиями твердения. Наличие постоянной щелочной среды способствует, как отмечает В.Д. Глуховский, формированию тоберморитоподобных гидросиликатов кальция, а также соединений типа гидрогранатов, смешанных новообразований щелочно-щелочноземельного состава. В числе этих соединений: $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$; $6\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (ксонотлит), $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,5\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (гидрогранат); $(\text{Na}, \text{Ca})\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (натриево-кальциевый гидросиликат); $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (анальцит) и др. Эти продукты обеспечивают достаточную стабильность затвердевшего камня и их низкую растворимость в водной среде.

В некотором количестве сохраняются и метастабильные фазы, не успевая за период отвердевания перейти в устойчивое кристаллическое состояние, что аналогично формированию микроструктуры портландцементного камня.

Таким образом можно заключить, что при объединении каждого неорганического вяжущего вещества с водой (реже — с водными растворами солей) образуется тесто (паста), которое в конце второй стадии твердения переходит из вязко-пластичного в камневидное состояние. В нем к этому времени становится упорядоченной микроструктура за счет сформировавшейся кристаллической фазы, но сохраняется и другая — гелевая часть, которая в заданных условиях также в достаточной мере устойчива и находится в твердообразном состоянии, но отвердевшее камневидное вещество еще в течение длительного времени (иногда многие годы) способно при благоприятных условиях к спонтанному дальнейшему упорядочению микроструктуры с ее упрочнением и стабилизацией. Возможен, однако, и обратный эффект — разупрочнение — в тех случаях, когда вследствие рекристаллизации или появления новых микрообъемов кристаллической фазы, возникающей из резервов ранее не прореагировавшего вяжущего вещества или гелевой части, образуются внутренние напряжения и локальные микроразрушения структуры материала.

9.3. ЗАПОЛНЯЮЩИЕ КОМПОНЕНТЫ В КОНГЛОМЕРАТАХ И ДОБАВКИ, ВВОДИМЫЕ В СМЕСИ

Заполнители (и наполнители) классифицируют по составу — неорганические и органические, происхождению — природные и искусственные, внешнему виду и форме частиц — зернистые (крупно-, средне- и мелкозернистые), порошкообразные, фиброволокнистые, стержневые и др., средней плотности — тяжелые и легкие, плотные и пористые, по взаимодействию с вяжущим веществом — высокоактивные, активные, малоактивные и неактивные.

Заполнители (и наполнители) получают либо непосредственно из пород, либо с помощью химической переработки сырья. Их изготавливают в производственных условиях в результате выполнения определенных технологических операций: измельчение и помол сырья, фракционирование, промывка, обезвоживание, сушка и, при необходимости, нагревание, обжиг и вспучивание, обогащение, химическая и физико-химическая обработка и др. Дробление грубозернистых заполнителей (щебня, гравия, древесной дробленки и др.) производят с целью получения крупных частиц необходимых размеров, повышенной однородности и плотности. Помол мелкозернистых материалов применяют для повышения их активности, увеличения удельной и суммарной поверхности минеральных порошкообразных продуктов. В табл. 9.3 приведены вид и степень измельчения материала.

Таблица 9.3. Степень измельчения материала при дроблении

Вид измельчения материала	Средний размер, мм		Степень измельчения D/d
	кусков до измельчения D	зерен или частиц после измельчения, d	
Крупное дробление	300—1500	100—300	2—6
Среднее дробление	100—300	10—50	5—10
Мелкое дробление	20—50	2—10	10—50
Тонкое измельчение	2—10	0,075—2	50—100
Сверхтонкое измельчение	0,075—2	0,0001—0,075	100

Материалы измельчают в дробилках, камнекрошилках и мельницах тонкого и сверхтонкого измельчения. Для повышения насыпной плотности (уменьшения пустотности) заполнителей их разделяют на фракции (фракционируют) с разной крупностью зерен, а из получаемых фракций составляют нужные смеси заполнителей. Фракционирование часто совмещают с измельчением. Порошкообразные наполнители фракционируют сепарацией, причем получаемые крупные частицы доизмельчаются повторно. Одним из важных свойств порошкообразного наполнителя служит плотность, зависящая от зернового состава. Степень дисперсности порошкообразного наполнителя ограничивается. При очень высокой дисперсности частицы спонтанно агрегируются (слипаются) с уменьшением удельной поверхности агрегатов, комкованием и повышением неоднородности. Необходимую степень дисперсности порошкообразного наполнителя определяют экспериментально, учитывая, что при длительном хранении высокодисперсного наполнителя происходит частичная потеря его активности вследствие адсорбции и хемосорбции веществ из окружающей среды.

Важная роль отводится промывке водой зернистых заполнителей (песка, гравия, щебня) для освобождения от загрязняющих глинистых, илистых, пылевидных и других примесей. Эти примеси ухудшают качество ИСК, уменьшают их однородность и прочность, препятствуют сцеплению заполнителя с вяжущим веществом. Промывку заполнителей водой часто совмещают с их фракционированием.

После промывки заполнитель обезвоживают механическим способом (отстаиванием, фильтрацией, отжимом, грохочением, центрифугированием, гидроклассификацией) или искусственной сушкой в карьерах и на заводах с помощью различных источников теплоты (газом, инфракрасными лучами, электрическим током высокой частоты и др.). Введение гидрофобных (водоотталкивающих) поверхностно-активных веществ при промывке способствует соскальзыванию с поверхности частиц водяных капель. В некоторых случаях заполнители промывают частью воды затворения, например при приготовлении бетонной смеси, и тогда загрязняющие примеси, входящие в водную суспензию, выполняют функции высокодисперсных наполнителей.

Очищение заполнителей возможно также сухими способами — с помощью плоских вибрационных или барабанных грохотов, пульсирующих обеспыливателей, методом рентгеносепарации и др.

В зимнее время заполнители не только сушат, но нередко еще нагревают до определенной температуры. Обычно это осуществляется в одном аппарате — сушильном барабане, на колосниковой решетке и др. Нагревают заполнители для придания им необходимого качества, например лучшей смешиваемости с вяжущим веществом. Легкие заполнители получают из горных пород (пемзы, туфов и др.), но в большей мере путем обжига вспучивающихся глин, перлитов, вермикулита, обсидиана, шунгита и других видов природного сырья, а также из побочных продуктов — шлаков, зол. С целью придания заполнителям большей однородности по зерновому составу или плотности их обогащают путем отделения механически слабых и неморозостойких включений.

В процессе подготовки некоторые заполнители подвергают химической и физико-химической обработке с целью повышения их активности при взаимодействии с другими компонентами ИСК, создания более благоприятных условий их производства, повышения плотности и прочности конгломерата и др. При такой обработке к заполнителям добавляют специальные вещества. Так, при производстве арболита и фибролита в органические заполнители (древесную стружку, древесную дробленку, льняную и конопляную костру и т. п.) вводят добавки минерализаторов для повышения химической стойкости смешиваемых с заполнителями минеральных вяжущих веществ. При производстве асфальтобетона и дегтебетона в минеральные наполнители вводят гидрофобизирующие добавки с целью повышения адгезии органического вяжущего вещества к минеральным заполнителям.

Химическую и физико-химическую обработку заполнителей иногда совмещают с механической обработкой, например помолом. При этом с поверхности зерен заполнителя удаляются недостаточно активные адсорбированные слои, благодаря чему поверхность обновляется, становится более активной при взаимодействии с вяжущими веществами.

При транспортировании принимают меры против загрязнения промытых и непромытых заполнителей, увлажнения высушенных и охлаждения нагретых заполнителей, поэтому транспортирование оказывает как бы некоторое косвенное влияние на структурообразование ИСК.

Важное значение для бесперебойного, устойчивого производства имеет хранение заполнителей и наполнителей в бункерах и других хранилищах. От правильного хранения зависят однородность этих материалов, а следовательно, структура и качество ИСК. При хранении заполнителей и особенно мелкофракционных наполнителей, например, в бункерах иногда образуются своды и зависания, вследствие чего самопроизвольно прекращается их истечение из отверстия. Это ухудшает условия дозировки заполнителей, вызывает простои оборудования, понижает производительность труда, отражается на структуре и качестве ИСК. Образование сводов и зависаний является сложным процессом, зависящим от многих факторов. Для их предотвращения применяют обрушающие устройства, которые устанавливают в бункерах или снаружи.

Заполнители и наполнители дозируют по массе или по объему, причем эти операции на многих заводах автоматизированы. Большое значение имеют точность и своевременность дозирования.

Важной операцией, влияющей на качество ИСК, является предварительное сухое перемешивание заполнителей, а при необходимости — и наполнителей. При перемешивании разрушаются начальные связи между частицами, вследствие чего повышается их подвижность, что способствует, в свою очередь, заполнению межзерновых пустот более мелкими фракциями и в итоге — равномерному распределению частиц. Перемешивание сухих (нагретых или холодных) заполнителей и наполнителей сопровождается переходом теплоты от более нагретых к менее теплым равномерным распределением частиц и теплоты по объему.

9.3.1. ЗАПОЛНИТЕЛИ НЕОРГАНИЧЕСКИЕ

Наибольший объем в ИСК занимает заполняющий компонент (заполнитель). В бетонах и растворах, например, его содержание может быть до 95% по объему. Поэтому выбору качества и разновидности заполнителей всегда уделяется большое внимание. Применяют заполнители неорганические и органические; преимущественное применение имеют неорганические, особенно при производстве бетона, железобетона и асфальтобетона.

Заполнители неорганические, или минеральные, получают путем разработки месторождений рыхлых горных пород в виде песка или гравия, природного щебня. Широко используют дробленые горные породы — щебень, высевки, песок. Кроме природных, в качестве заполнителей применяют также искусственные, получаемые путем обжига глинистого сырья, других видов минерального сырья, дроблением металлургических шлаков.

Заполнители разделяются на мелкие и крупные. Отнесение к этим разновидностям по крупности зависит от размера наиболее крупного зерна. У мелкого заполнителя зерна не больше 5 мм, причем при просеивании остаток на сите с отверстиями 5 мм должен быть не более 5% по массе. Типичным представителем мелкого заполнителя является песок. У крупного заполнителя все зерна крупнее 5 мм. Размер наиболее крупных зерен в заполнителе также ограничивается: в зависимости от разновидности ИСК в пределах 70–80 мм. Крупный заполнитель называют щебнем при угловатых зернах или гравием — при округлых зернах.

Заполнители характеризуют зерновым (гранулометрическим) составом. С целью определения зернового состава производят рассев пробы заполнителя через стандартный набор сит. Наименьшее отверстие в сите 0,14 мм, наибольшее — 70 мм. При лабораторном расसेве пробы заполнителя на ситах между двумя соседними ситами, например 10 и 20 мм или 1,25 и 2,5 мм, задержатся зерна различной крупности в указанных пределах, что составляет соответственно фракцию 10–20 мм или фракцию 1,25 мм. Нередко зерновой состав называют фракционным.

Фракционный состав заполнителя является непрерывным, если содержатся все фракции, на которые рассеивается заполнитель с помощью сит. Фракционный состав — прерывистый, если в заполнителе отсутствует одна или две фракции.

Плотную смесь заполнителя получают путем смешивания различных отдельно взятых фракций заполнителя, количество которых рассчитывают по соответствующим формулам или подбирают по графикам, иногда — опытным путем.

Зерновые составы плотных смесей приводятся в ГОСТе с указанием колебаний в содержании фракций, допустимых без снижения качества готовых материалов. При окончательном выборе зернового состава учитывают не только насыпную плотность смеси или ее пустотность, но и удельную поверхность. Желательно уменьшать удельную поверхность в плотной смеси, с тем чтобы сэкономить на расходе вяжущего вещества.

Кроме фракционного состава, насыпной плотности и пустотности заполнителей при оценке качества определяют показатели прочности, морозостойкости (в отношении щебня), степень загрязненности посторонними примесями, форму частиц. Учитывают также состояние поверхности зерен заполнителя, так как чем более гладкая поверхность у зерен заполнителя, тем ниже, как правило, сцепление зерен с вяжущим веществом. При необходимости оценивают химическую стойкость, водостойкость и др.

Важной характеристикой заполнителя, особенно крупного, является величина насыпной плотности. Тяжелые заполнители показывают в россыпи насыпную плотность свыше 1000 кг/м^3 . Легкие заполнители облегчают конструкции и поэтому широко применяются в жилищном строительстве; их насыпная плотность составляет около 500 кг/м^3 .

Поскольку, как отмечалось выше, заполнители в ИСК занимают большую часть объема и поэтому их расход очень большой, то имеет значение стоимость заполнителей. В этом смысле всегда остаются предпочтительными заполнители из местных сравнительно

дешевых материалов, в том числе из побочных продуктов местной промышленности. Однако требуется повышенное внимание к оценке их качества.

В теории ИСК предусмотрен показатель качества заполнителя, определяемый непосредственно в конгломерате по интенсивности изменения его свойств, например, прочности, определяемой по формуле (3.3). В последней этот комплексный показатель выражен величиной n . Его числовое значение зависит от плотности зерновой смеси, формы и размера частиц, состояния поверхности зерен, их прочности, способности к адгезии с вяжущим веществом и других качественных характеристик заполнителя. Числовые значения комплексного структурного показателя n стремятся уменьшить путем промывки заполнителя, фракционирования, обогащения, обработкой ПАВ или другими технологическими приемами. Из формулы (3.3) очевидно, что чем меньше числовое значение n , тем выше положительная роль заполнителя в ИСК как структурного элемента.

Мелкие заполнители. К мелким заполнителям относится природный или искусственный песок. Как правило, наилучшими песками в ИСК являются кварцевые. Однако при производстве безобжиговых материалов (бетонов, асфальтобетонов и т. п.) их заменяют и другими природными песками. Во всех песках ограничивается содержание вредных примесей, к которым относятся глинистые и пылеватые фракции, сернистые и сернокислые соединения (пирит, гипс и др.), а также слюды, органические примеси (остатки неразложившихся растений, гумус, ил и пр.). Для разных конгломератных материалов устанавливают конкретные пределы допустимого содержания вредных примесей, которые учитываются в качестве обязательных условий при применении местных песков, и приводятся специальные методики определения различных вредных примесей.

Среди природных песков встречаются горные (овражные), речные, морские, барханные, дюнные и другие разновидности. Каждая из них имеет положительные и отрицательные показатели, проявляющиеся при использовании их в качестве мелких заполнителей: горные пески содержат повышенное количество глинистых и органических примесей; морские кроме кварцевых зерен могут иметь обломки раковин, снижающие прочность некоторых конгломератов (цементных бетонов и др.); речные и морские имеют излишне отполированную поверхность зерен, не обеспечивающую достаточного сцепления их с вяжущим веществом; дюнные и барханные пески сложены весьма мелкими частицами, не отвечающими требованиям стандарта. При тщательной проверке качества песков выбирают наилучшую разновидность и рекомендуют к применению в данном ИСК с учетом ее стоимости и требуемого расхода вяжущего вещества.

Особое внимание уделяется зерновому составу песка. Важно, чтобы содержание фракций в пределах 0,16—5,0 мм было таким, при котором обеспечиваются минимальные значения пустотности и удельной поверхности.

В зависимости от зернового состава песок разделяют на крупный, средний, мелкий и очень мелкий. Крупность оценивается по величине модуля крупности:

$$M_K = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}}{100}. \quad (9.2)$$

Модуль выражает частное от деления на 100 суммы полных остатков (в %) песка на ситах, начиная с сита с размером отверстий 2,5 мм и кончая ситом с отверстиями 0,16 мм. Полным остатком песка A_i на каждом сите называют сумму частных остатков a_i , на данном сите (в %). Частный остаток a_i песка на каждом сите — это отношение массы m_i остатка на данном сите к массе m просеиваемой навески (в %): $a_i = m_i/m$.

После предварительного отсева от природного песка зерен крупнее 5 мм модуль крупности песка M_K и полный остаток на сите с сеткой 0,63 мм должны соответствовать величинам, указанным в табл. 9.4.

Таблица 9.4. Классификация песков по крупности

Группа песка	Полный остаток на сите № 063 по массе, %	Модуль крупности M_k
Крупный	Более 45	Более 2,5
Средний	От 30 до 45	2,0—2,5
Мелкий	От 10 до 30	1,5—2,0
Очень мелкий	До 10	1,0—1,5

Для повышения однородности зернового состава песок иногда фракционируют, чаще всего на две фракции — крупную и мелкую: крупная — с размером зерен 1,25 — 5,0 мм, мелкая — от 0,63 до 0,16 мм. В необходимых случаях зерновой состав подбирают таким образом, чтобы он соответствовал кривым просеивания плотных песчаных смесей (рис. 9.5). В правильно назначенном зерновом составе пустотность песка не превышает 38%. Всегда учитывают содержание воды, так как фактическая масса фракции в сухом песке уменьшится, а при дозировании или приемке по объему учитывают, что самый большой объем песок занимает при 5 — 7% влажности (по массе). Косвенной характеристикой пустотности служит его насыпная плотность, которая у сухого кварцевого песка в рыхлом состоянии колеблется в пределах 1500—1550 кг/м³, а в уплотненном встряхиванием состоянии — в пределах 1600—1700 кг/м³.

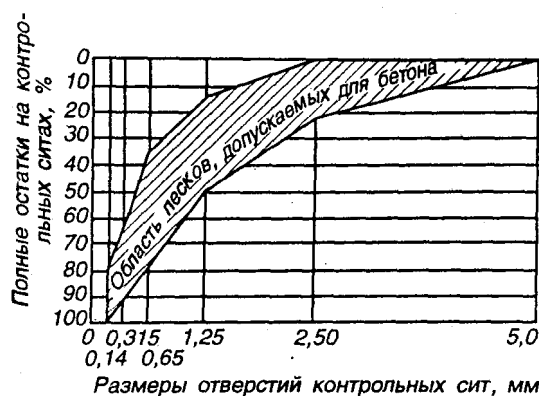


Рис. 9.5. График зернового состава песка для бетона

Дробленый, или искусственный, песок получают путем дробления свежих невыветренных магматических, метаморфических или плотных карбонатных осадочных пород, предел прочности которых свыше 50 МПа. При дроблении стремятся получить угловатую и кубовидную форму зерен, что в большой степени зависит от выбранного механического оборудования. Кроме горных пород для получения дробленых песков могут оказаться пригодными некоторые разновидности шлаков, кирпичного боя шамотного легковеса (боя) и других побочных продуктов производства. Однако при использовании последних важно предотвратить попадание в получаемые пески всех тех вредных примесей, которые указаны выше в отношении природных песков. Весьма ценятся облегченные искусственные пески, получаемые измельчением природных и особенно искусственных легких заполнителей. Стоимость дробленого песка выше природного, поэтому его обычно применяют для улучшения природных мелкозернистых песков при ответственных работах. Облегченные пески предназначены для керамзитобетона, вакулитобетона и других легких и особо лёгких конгломератов.

Крупные заполнители. В искусственных строительных конгломератах различного назначения в качестве крупного неорганического заполнителя применяют гравий и щебень. Тот и другой могут быть природными, добываемыми в соответствующих месторождениях, однако обычно под щебнем понимают не природный, а получаемый специальным дроблением материал.

Природный гравий представляет собой рыхлую смесь скатанных обломков размером от 5 до 70 мм. Горный гравий по сравнению с речным, морским и ледниковым обладает более угловатыми с шероховатой поверхностью обломками и большим количеством пылевато-глинистых примесей. Обломки гравия, обработанные водой, имеют гладкую поверхность, что ухудшает её сцепление с вяжущим веществом. Лучшей разновидностью гравия считается ледниковый, который менее окатан и имеет более равномерный зерновой состав. Все разновидности гравия (а также природного щебня и дресвы) характеризуются неоднородным петрографическим и минеральным составом, так как в их образовании участвуют разнообразные горные породы и минералы. Поэтому оценка их прочности производится на образцах средних проб с отбором из них зерен слабых и неморозостойких пород и определением их содержания в процентах по массе.

Прочность щебня характеризуется маркой и определяется по его дробимости при сжатии (раздавливании) в металлическом цилиндре. Значительное содержание в гравии выветрелых обломков осадочных и других пород (иногда до 40—60%) ухудшает их механические свойства; присутствие же обломков магматических пород (гранитных валунов) и песчаников повышает его качество. При разработке гравийных отложений производится разделение их по зерновому составу, поскольку другие виды обогащения затруднительны. Встречающиеся в них отдельные крупные глыбы и гальку подвергают дроблению, что хотя и увеличивает стоимость, но при этом повышает качество гравийного материала. Аналогичным путем поступают и при разработке отложений природного щебня, сложенного преимущественно остроугольными обломками размером до 100—150 мм. При содержании в гравии природного песка от 25 до 40% материал называют песчано-гравийной смесью. Применение гравия и песчано-гравийной смеси в производстве строительных материалов производится после предварительных лабораторных проверок прочности, морозостойкости и других показателей качества в зависимости от конструктивных особенностей сооружения.

Щебень — материал, получаемый дроблением горных пород, валунов, гальки или искусственных камней. Для этого применяют различные по конструкции и мощности камнедробильные машины (рис. 9.6), от которых зависит качество получаемой продукции. Лучшей формой щебенки считается кубовидная или тетраэдрическая, размером 5—70 мм. Содержание щебенки лещадной и игловатой форм не должно превышать 10—15% по массе. Одновременно со щебнем в камнедробильных машинах получают более мелкие песчаные (высевки) и пылеватые фракции, которые отделяются от него в процессе грохочения.

На качество щебня установлены требования в соответствующих ГОСТах в зависимости от его назначения (для бетона, асфальтобетона, легкого бетона и др.). Эти требования в основном сходны: по дробимости щебня в металлических цилиндрах при сжатии, морозостойкости, истираемости и сопротивлению удару, зерновому составу, прочности исходной породы, (обычно в водонасыщенном состоянии).

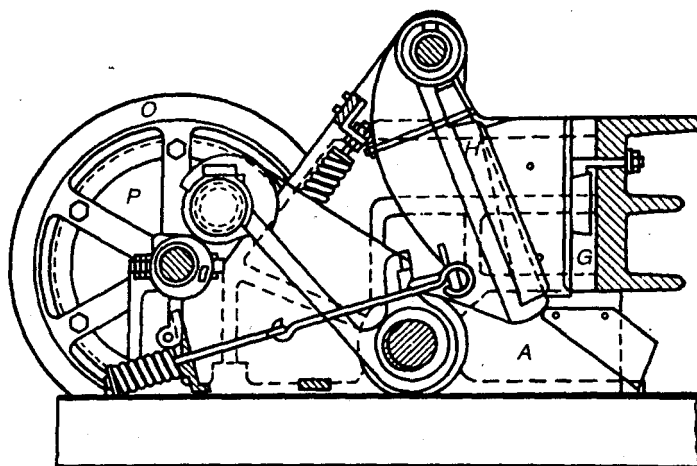


Рис. 9.6, Щековая дробилка для изготовления щебня: *P* — маховик; *H* — подвижная щека; *G* — неподвижная щека; *A* — станина

При производстве щебня из горных пород отдают предпочтение магматическим, особенно гранитам, габбро, диабазам, базальтам, а из осадочных — известнякам, доломитам, из побочных продуктов производства — шлакам доменного процесса, отходам керамического производства.

Широкое использование имеют легкие крупные заполнители. Природные заполнители получают дроблением пористых известняков, известняков-ракушечников, вулканических и известковых туфов и некоторых других пористых пород; искусственные — путем термической обработки в основном алюмосиликатного сырья с получением керамзитового, аглопоритового гравия или щебня а также шунгизита, вакулита, вспученного перлита, термозита (шлаковой пемзы) и других пористых материалов с насыпной плотностью от 250 до 1100 кг/м³. Керамзитовый гравий и песок получают путем вспучивания в процессе ускоренного обжига (до 1200°C) гранул из легкоплавкой глины. Вспучивание происходит вследствие выделения газообразных соединений (СО₂ и др.) внутри каждой гранулы. Аглопоритовый щебень и песок — путём спекания глинистой породы и отходов от добычи, переработки и сжигания каменных углей на специальных агломерационных металлических решетках с последующим дроблением продуктов обжига. Вакулитовый полый гравий получают путём накатывания слоя малопластичных высокодисперсных пород типа суглинков, супесей, зол ГЭС сланцевых, и других на «ядро» из легкосгораемого органического материала (опилок, торфа, лигнина и др.) и последующего обжига получаемых при этом сырьевых гранул. Сильно поризованные особо легкие щебень и песок получают при нагревании (обжиге) вермикулита, вулканического стекла обсидиана, кремнеземистой горной породы перлита и др. Так, например, при температурах 950—1200°C вода выделяется из перлита и вспученный перлит увеличивается в объеме в 15—20 раз. Получил расширенное применение шунгизит, сырьем для производства которого являются вспучивающиеся шунгитовые сланцы, содержащие до 3% шунгита — углерода особой формы.

Если требуется повышенная прочность, то искусственный заполнитель получают утяжеленный. Для этого из маловспучивающегося глинистого сырья изготавливают керамдор, из регенерированной стекломассы — дорсил и др., качество которых обуславливается специальными требованиями заказчиков-строителей.

Заполнители сильно различаются между собой по прочности. Предел прочности при сжатии образцов, изготовленных из разных заполнителей, изменяется у тяжелых горных пород от 10 до 500 МПа, у легких — от 0,4 до 25 МПа. Принято, чтобы прочность заполнителя превосходила прочность конгломерата на 20—50%, но целесообразнее каждый раз обосновывать минимально допустимую прочность заполнителя по характеристике вяжущего вещества оптимальной структуры.

Для тяжелого бетона марки 300 и выше прочность исходной горной породы в насыщенном водой состоянии должна быть в 2 раза больше этой марки.

В настоящее время прочность крупного заполнителя определяют методом раздавливания его пробы в металлическом цилиндре с вычислением показателя дробимости по формуле

$$D_p = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100, \text{ где } m_1 \text{ — проба щебня (гравия), кг; } m_2 \text{ — масса остатка на}$$

контрольном сите после просеивания раздробленной в цилиндре пробы щебня (гравия), кг. По дробимости различают щебень (гравий) следующих марок: 1400, 1200, 1000, 800, 600, 400, 300 и 200. В пределах этих марок по дробимости при сжатии в цилиндре установлены допустимые содержания зерен слабых пород, т. е. с прочностью при сжатии в водонасыщенном состоянии образцов менее 20 МПа.

По морозостойкости щебень делится на шесть марок: Мрз 15, 25, 100, 150, 200 и 300. Числа марок соответствуют количеству циклов попеременного замораживания и оттаивания образцов, при котором потеря массы крупного заполнителя не превышает 5% (для Мрз 15 и 25 допускается потеря массы до 10%). Следует отметить, что эти требования к качеству щебня относятся в основном при его применении в бетонах. Для других видов ИСК технические требования несколько отличаются. Особое значение придается обоснованию наибольшей крупности зерен и зерновому составу: первое — исходя из размера конструктивного элемента, второе по предельным значениям, которые даны в табл. 9.5.

Таблица 9.5. Пределы зернового состава крупного заполнителя

Размер отверстий контрольных сит, мм	D_{min} для фракций с наименьшим размером зерен, мм		$0,5(D_{min} + D_{max})$		D_{max}	$1,25D_{max}$
	5(3)	10 и более	одной фракции	смеси фракций		
Полный остаток на ситах по массе, %	95—100	90—100	40—80	50—70	0—10	0

Из таблицы следует, что зерновой состав крупного заполнителя зависит от D_{max} — наибольшей крупности зерен щебня или гравия и от D_{min} — наименьшего размера зерен щебня или гравия. При назначении D_{max} исходят не только из фактического состава материала (размера отверстия сита, на котором полный остаток не превышает 10% навески), но и из характера конструкции или изделия, для которого изготовляют конгломерат с применением крупного заполнителя. Так, например, в случае железобетона наибольшая крупность зерен не должна превышать $\frac{3}{4}$ наименьшего расстояния между стержнями арматуры и не более $\frac{1}{2}$ толщины плиты. Аналогичными соображениями руководствуются и в других конструкциях. В общем случае размер заполнителей не должен превышать 0,25—0,35 минимального размера конструкции и не больше 0,65—0,75 минимального расстояния между стержнями арматуры.

По крупности плотный гравий и щебень разделяют на фракции 5—10, 10—20, 20—40 и 40—70 мм просеиванием сухой пробы в количестве 10 кг через стандартный набор сит с размерами отверстий 70, 40, 20, 10 и 5 мм. По крупности пористый гравий и щебень применяют трех фракций: от 5 до 10 мм, от 10 до 20 мм и от 20 до 40 мм. Вместо фракций 5—10 мм в легких бетонах допускается применять фракции 3—10 мм, а вместо фракций 10—20 мм использовать фракции 10—15 мм.

Для всех разновидностей заполнителей имеет важное значение коэффициент размягчения — отношение предела прочности породы в водо-насыщенном состоянии к прочности при сжатии в сухом состоянии, поскольку он косвенно характеризует морозостойкость материала. Его величина для плотных заполнителей должна быть не менее 0,85, а при

заполнителях пористых — не менее 0,8 и только в конгломератах теплотехнического назначения этот показатель должен быть не менее 0,7. Во всех случаях требуется учитывать требования последних стандартов на соответствующие разновидности тяжелых и легких заполнителей по показателям их качества.

Кроме зернистых используют заполнители иной формы. Большое распространение в технологии различных ИСК получают волокнистые заполнители, выполняющие в структуре функции армирующего компонента. Волокнистые заполнители направленного (ориентированного) или хаотического расположения увеличивают способность конгломератов к сопротивлению изгибающим и растягивающим нагрузкам. С этой целью используют короткие стальные волокна длиной до 25 мм и диаметром 0,005—0,015 мм, называемые фиброй, стекловолокно, волокна из расплава шлака, керамики, горных пород (например, асбеста, базальтов), которые имеют гораздо большие значения упругости по сравнению с ИСК, например бетоном. Внесение в состав волокнистого заполнителя несколько усложняет технологию ИСК, но приносит эффект в упрочнении конструкций, если только была обоснованно выбрана разновидность волокна. Так, например, обычное стекловолокно сравнительно быстро разрушается в щелочной среде цементного камня, поэтому у нас и за рубежом предложены составы щелочестойких стекловолокон.

В составе некоторых конгломератов, особенно на основе полимерных вяжущих веществ, нередко используют заполнители с частицами пластинчатой формы с образованием своеобразных композиционных материалов. Своеобразным видом «активного заполнителя» может быть и металлическая арматура, например стальная в железобетоне, часто выполняющая функции каркаса в ИСК, если ей придана форма сетки. Направленное расположение арматуры повышает анизотропность получаемого материала (подобно анизотропии кристаллов), что может благоприятствовать механическому упрочнению конструкции. Однако наблюдаются случаи, когда в эксплуатационный период нарушается сцепление вяжущего с арматурой. Тогда такой «заполнитель» становится мало активным, что отрицательно отразится на надежности конструкции в здании или сооружении. Определение разновидности и количества арматуры в теории железобетона производится специальным расчетом.

Во всех случаях необходима периодическая оценка заполнителей на содержание естественных радионуклидов.

9.3.2. ЗАПОЛНИТЕЛИ ОРГАНИЧЕСКИЕ

Органические заполнители применяют для производства теплоизоляционных, а также теплоизоляционно-конструкционных и конструкционных материалов и изделий: арболита, цементного фибrolита, ксилолита, камышебетона, торфоплит, теплоизоляционных плит из костры льна, древесноволокнистых и древесностружечных плит и др.

В качестве древесных и других органических заполнителей используют отходы лесозаготовок (вершины, сучья, пни, корни и др.), лесопиления и деревообработки (горбыли, рейки, щепу, стружки и опилки), одубину (отходы заводов дубильных экстрактов), сечку камыша, сельскохозяйственные отходы (рисовую солому, льняную и конопляную костру, стебли хлопчатника, подсолнечную лузгу), побочные продукты целлюлозно-бумажной промышленности и др. Основными являются древесные и сельскохозяйственные отходы.

Сырьевая база для получения древесных заполнителей остается практически неограниченной, поскольку ежегодный объем древесных отходов составляет примерно 150 млн.м³, большая часть которых пока рационально не используется. У органических заполнителей имеется между собой много общего, в частности они имеют близкие химические составы. За последние годы увеличилось внимание к полимерным заполнителям.

Древесные заполнители. На качество ИСК, в которых применяют древесные заполнители, оказывает влияние порода дерева. Древесные заполнители получают главным образом из отходов хвойных пород (ели, пихты, сосны и др.) и реже из отходов лиственных пород (осины, березы, бука и др.).

Из древесных заполнителей более перспективными являются отходы деревообработки. Их подвергают предварительной подготовке с целью освобождения от загрязняющих примесей и получения частиц нужной формы (дробленка, стружки или древесная шерсть) и размеров. Кусковые отходы древесины перерабатывают в два этапа. Первичную переработку производят с помощью рубильных машин, в результате чего получают технологическую щепу в виде ромбовидных кусков с размерами по длине волокон древесины 10—40 мм. Щепка непригодна для изготовления ИСК, так как является слишком крупной, и изделия с ней имеют большую пористость и низкую прочность. При вторичной переработке на молотковых мельницах (дробилках) и стружечных станках технологическую щепу превращают в дробленку и стружку. Кроме специально приготовленной стружки применяют также стружку и опилки от столярного и мебельного производства. Древесную шерсть готовят из чураков на древесно-шерстяных станках.

Дробленку (дробленую древесину), представляющую собой пластинчатые или игольчатые частицы длиной (вдоль волокон древесины) 2—20 мм и толщиной до 5 мм, получают из кусковых отходов (горбылей, реек, обрезков). Предварительно, до употребления, дробленку длительное время (6—12 мес.) выдерживают на складах. Состав дробления, % по массе: фракций размером 20—25 мм — не более 5; 10—5 мм — 30—35; 5—2 мм — 55—60; мельче 0,25 мм — не более 5. Ее применяют при изготовлении арболита, т. е. деревобетона (с минерализацией) и теплоизоляционных плит (без минерализации). Под минерализацией понимается химическая обработка заполнителя, например хлористым кальцием.

Для древесностружечных плит, плит фибrolита (для черного пола, перегородок, облицовки панелей стен и др.), теплоизоляционного материала используют стружку лиственных и хвойных пород.

Размеры лепестков стружек, полученных на стружечных станках: длина 2—20 мм, минимальная толщина 0,1—1 мм.

При изготовлении изделий с применением цемента (например, арболита) стружки минерализуют раствором соли, например CaCl_2 .

Древесная шерсть, применяемая для изготовления цементного фибролита, состоит из длинных тонких стружек (ленточек) длиной 500 мм, шириной 2—5 мм и толщиной 0,2—0,7 мм. Ее получают строганием специально приготовленных окоренных чураков длиной 0,5 м и диаметром 10—35 см; допускается применять более тонкие чураки диаметром 8—9 см, а также более толстые — диаметром свыше 35 см. С этой целью неделовую древесину — тонкомерный кругляк, дровяное долготье и отходы лесопиления (горбыль, срезки) — освобождают от коры и выдерживают в теплое время (весенне-летний период) в штабелях, распиливают пилой на чурки длиной 0,5 м и затем строганием на древесно-шерстяных станках готовят из чураков древесную шерсть. Ее сушат в конвейерных сушилках до влажности 20—25% и минерализуют.

Опилки в зависимости от характера распиловки разделяют на два основных вида — опилки от поперечной и продольной распиловки. При поперечной распиловке древесины на круглопильных станках получают более мелкие частицы, чем при продольной распиловке, с волокнистым строением. Эти опилки почти полностью проходят через сито с диаметром отверстий 2 мм, и основной фракцией в них является 1—2 мм. При продольной распиловке бревен на лесопильной раме получают опилки кубовидной формы разных размеров — от крупных частиц (7 мм) до пылевидных. Наибольшая часть опилок имеет размеры от 2 до 5 мм. Кубовидная форма частиц обуславливает высокое отношение торцовых поверхностей к боковым, вследствие чего материалы и изделия из опилок обладают повышенными водопоглощением и впитываемостью связующих веществ, так как показатели этих свойств вдоль волокон больше, чем поперек.

Опилки, полученные при распиловке неокоренной древесины, содержат примеси коры, причем с увеличением размеров фракций опилок увеличивается и количество коры в них. По сравнению с другими древесными заполнителями опилки имеют некоторые преимущества. Вследствие однородного строения частиц они обладают хорошей текучестью, что важно при прессовании из них изделий. При увеличении давления прессования и температуры текучесть повышается. Пористость опилок (сумма пор частиц опилок и пустот между ними) составляет примерно 71—75% по объему, т. е. весьма значительная.

Опилки применяют для изготовления опилкобетона, гипсоопилочных блоков, ксилолита и др., причем используют отходы главным образом хвойных пород и значительно меньше — лиственных.

Свойства древесных заполнителей. На качество ИСК большое влияние оказывают свойства древесных заполнителей.

Большое значение имеют средняя плотность древесины и насыпная плотность древесного заполнителя, которые зависят от многих факторов. Средняя плотность древесины колеблется в широких пределах — от 380 до 1100 кг/м³ (в абсолютно сухом состоянии), а насыпная, например осиновой дробленки, — 555 кг/м³, березовой — 247,2 кг/м³ (в абсолютно сухом состоянии).

Важным свойством древесного заполнителя является его пористость, от которой зависит пористость ИСК. В заполнителе имеются поры внутри частиц и поры (пустоты) между ними. Пористость зависит от различных факторов — от крупности частиц, степени уплотнения и др. При средней плотности древесины 300, 500 и 700 кг/м³ (в абсолютно сухом состоянии) ее пористость равна соответственно 81, 68 и 55%. Для получения наиболее плотного ИСК необходимо подбирать смесь частиц древесного заполнителя с минимальной пористостью.

Большое влияние на качество древесных ИСК оказывает и влажность древесных отходов. Влажность древесины у разных пород дерева различна, а для одной и той же породы она зависит от местоположения в стволе, от времени года, суток, от температуры и др. Значительно увлажненные отходы плохо поддаются переработке их в заполнители,

например при переработке в стружку сильно увлажненной щепы частицы стружки становятся значительно разволокненными и получается стружка низкого качества. Различия во влажности дерева, его отходов и, следовательно, в древесных заполнителях оказывают отрицательное влияние на однородность ИСК.

Древесные заполнители обладают значительным водопоглощением. Вода поглощается оболочками клеток древесины (связанная, или гигроскопическая влага) и капиллярами (свободная, или капиллярная влага), т. е. полостями клеток, межклеточными пустотами, а также сосудами (у лиственных пород). Количество капиллярной влаги в заполнителе зависит от общего объема капилляров в древесине, а водопоглощение — от крупности его частиц: чем они мельче, тем больше водопоглощение, так как увеличивается удельная поверхность. Наибольшее количество воды заполнитель поглощает в первые полтора часа, например древесная дробленка до 160—190% от абсолютно сухой массы.

Древесный заполнитель обладает также гигроскопичностью, причем при поглощении влаги древесина набухает, что сопровождается давлением разбухания. Набухание происходит при поглощении влаги оболочками клеток, которые при этом увеличиваются в объеме, тогда как поглощение влаги капиллярами древесины набухания не вызывает. При расчете составов ИСК (например, арболита) учитывают набухание древесного заполнителя.

При высыхании древесного заполнителя происходит уменьшение его объема (усушка). Усушка древесины связана с испарением влаги из клеточных оболочек; при удалении ее из капилляров усушки не происходит. Наибольшая усушка происходит поперек волокон (до 12%), а вдоль волокон она незначительна (0,1%). В целом усушка древесного заполнителя в ИСК вызывает дополнительные напряжения и влияет на деформативные свойства. Вследствие волокнистого строения древесный заполнитель вызывает некоторую анизотропию прочности ИСК.

Частицы древесного заполнителя обладают упругостью, которая отрицательно влияет на эффект прессования изделий, поэтому заполнитель длительно увлажняют горячей водой. В результате частицы древесины размягчаются, становятся менее упругими и легче сжимаются при прессовании.

Содержание хвой в заполнителях должно быть не более 5%, а коры — не более 15% массы абсолютно сухой древесины. Не допускаются заполнители, имеющие гнилостный запах и гнили. Гниль необходимо удалить просевом заполнителей через сито с отверстиями 1,5—2 мм.

Заполнители из камыша и костры. В разных районах нашей страны имеются большие заросли камыша. Сечку камыша применяют в качестве заполнителя при изготовлении арболита.

Ее готовят из зрелых стеблей камыша наиболее благоприятной зимней заготовки. Стебли камыша сначала режут на силососоколомо-резке и затем дополнительно измельчают на молотковой дробилке. Частицы полученной сечки имеют длину 7—35 мм, ширину 2—6 мм и толщину 1—2 мм. По техническим требованиям наибольшая крупность сечки 5 мм.

Средняя плотность сечки составляет 150—155 кг/м³. Насыпная плотность колеблется в широких пределах — от 60 кг/м³ для фракции 0—1,2 мм до 120 кг/м³ для фракции 5—10 мм, а межзерновая пустотность соответственно от 77 до 88%.

Перед применением сечку подобно некоторым древесным заполнителям минерализуют.

Костра лубяных культур — конопли и льна — является распространенным и дешевым сырьем. Ежегодный выход этой костры на заводах составляет в нашей стране около 1 млн. т.

Конопляную и льняную костру применяют для изготовления арболита, причем наиболее широко используют конопляную костру. Льняную костру, кроме того, применяют для изготовления теплоизоляционных плит.

Конопляная костра — это отход первичной переработки стеблей конопли на пеньку. Она представляет собой мелкие частицы раз дробленной одревесневшей части стебля неправильной формы длиной 10—70 мм и в поперечнике 2—2,5 мм.

Насыпная плотность костры 100—120 кг/м³, влажность 17—22%. Костра имеет большое водопоглощение — через 8 ч оно достигает 450% по массе.

До первичной обработки стебли конопли вымачивают 20—30 суток в естественных водоемах или в заполненных водой ямах, или в бассейнах с горячей водой на пенькоперерабатывающих заводах. Биохимические процессы происходят с вымыванием из костры во-до-растворимых веществ — Сахаров, органических кислот, минеральных солей. Ввиду небольшого диаметра стеблей конопли и большой их пористости экстрактивные вещества удаляются из них быстрее и более полно, чем из древесины. Такая обработка конопли защищает цементный камень от коррозии, поэтому при производстве арболита из конопляной костры ее не замачивают в воде с минерализаторами.

Влажность конопляной костры, применяемой для арболита, должна быть не более 20% по массе, ее хранят в закрытом складе или под навесом.

Льняная костра состоит из узких тонких пластин длиной до 50, шириной до 3 и толщиной до 3 мм. Насыпная плотность ПО— 120 кг/м³, влажность (в отвалах) 15—20%, водопоглощение 220—240%, гигроскопичность до 25%. В ней содержится больше, чем в конопляной костре, вредных для цемента веществ; при применении с цементом ее минерализуют.

Использование древесных и других растительных заполнителей для изготовления различных ИСК дает возможность получать большой экономический эффект; уменьшить загрязненность окружающей среды.

Полимерные заполнители. Основным полимерным заполнителем является пенополистирол в виде высокопористых гранул, получаемых из бисерного полистирола [-CH₂-CH(C₆H₅)-]_n и путем вспенивания его гранул при нагревании.

Насыпная плотность вспененных гранул составляет 15—20 кг/м³, а межгранульная пустотность — в среднем 40%.

Гранулы пенополистирола применяют для получения легких бетонов и новых эффективных теплоизоляционных материалов — пенопластов. Одним из перспективных пенопластов служит фености-ропор ФСП (разработанный ВНИИстром), в качестве связующего в котором применяют фенолоформальдегидный олигомер.

9.3.3. НАПОЛНИТЕЛИ

Наполнителями называют порошкообразные материалы, частицы которых соизмеримы с частицами вяжущего вещества. Как и заполнители, они могут быть неорганическими и органическими, непременным элементом в составе которых является углерод; природными и искусственными; простыми по химическому составу и сложными. Частицы наполнителя могут быть также пластинчатыми, волокнистыми. Размер частиц обычно от 10 до 100 мкм и не более 1—2 мм.

Наполнители совместно с вяжущим веществом участвуют в формировании микроструктуры матричной части и контактных зон в конгломератах. Тесному контакту этих двух компонентов в общей смеси способствуют механические, тепловые, ультразвуковые и другие способы обработки. Нередко сложно разграничить их функции в работе микро- или макроконгломерата. Обладая огромным потенциалом поверхностной энергии, наполнители становятся активными компонентами при отвердевании вяжущих веществ в процессе формирования структуры и свойств материала. Конкретный характер функций наполнителя зависит от разновидности вяжущего вещества. Однако можно выделить ряд сравнительно общих функций наполнителей: заполнение пор в микроструктуре без вступления в химические взаимосвязи с компонентами; увеличение водоудерживающей способности порошкообразного вяжущего вещества при использовании его в строительных растворах, укладываемых по пористому основанию, например в кирпичной кладке; перевод большей части органического вяжущего вещества из объемного в пленочное состояние с равномерным распределением его по высокоразвитой поверхности наполнителя для улучшения тепломеханических свойств; развитие зоны контакта между крупнозернистыми компонентами конгломерата; снижение теплового напряжения в материале, появляющегося за счет значительного различия в коэффициентах температурного расширения вяжущего вещества и заполнителя; улучшение некоторых специальных свойств конгломерата, например повышение огнестойкости, снижение истираемости и т. п.; удешевление материала за счет частичной замены дорогостоящего вяжущего местным дешевым наполнителем при сохранении качества на необходимом уровне. Могут быть у наполнителя и другие, нередко комплексные, функции. Так, например, он может выполнять роль твердого эмульгатора в пастообразных строительных материалах, порообразователя в обжиговых ИСК с выгоранием органического наполнителя, понизителя яркости тона в красочных составах с пигментами при удешевлении готового материала и т. п.

При большом многообразии функций наполнителя общим у каждого остается то, что в структуре конгломерата не теряется его индивидуальность, сохраняются специфические свойства компонента.

К наполнителям для применения в различных материалах относятся известняковые, доломитовые и другие природные порошки осадочных пород, тонкоизмельченные горные породы и минералы вулканического происхождения, порошки помола керамического боя, шамота, шлака и других отходов промышленности, асбестовые отходы производства, древесная мука (для пластмасс), зола-унос, колошниковая пыль и др. Для выбора необходимого наполнителя и определения его количества производятся лабораторные испытания как чистого вяжущего, так и вяжущего с наполнителем при сравнении их показателей при оптимальных структурах. Сравнением величин экстремумов свойств устанавливают степень эффективности наполнителя, рациональное содержание его в вяжущем веществе и ИСК.

9.3.4. ДОБАВОЧНЫЕ ВЕЩЕСТВА (ДОБАВКИ)

При производстве ИСК кроме вяжущих веществ, заполнителей и наполнителей широкое применение находят добавочные вещества в смесях, именуемые добавками. На стадиях технологического процесса они облегчают выполнение операций, снижают количество затрачиваемой энергии, уменьшают расход дорогостоящих компонентов, снижают материалоемкость, способствуют обеспечению необходимых показателей свойств материала, благоприятствуют ускорению или замедлению процессов структурообразования и отвердевания. На стадии эксплуатации конструкций добавки, введенные ранее в ИСК, призваны упрочнить, стабилизировать структуры материала, максимально тормозить неизбежную деструкцию, возникающую и развивающуюся в материале под влиянием внешней среды и внутренних самопроизвольных явлений.

Основное функциональное назначение добавок, и этим они отличаются от заполнителей и наполнителей, заключается в том, что они всегда достаточно активно взаимодействуют с одним или несколькими компонентами смеси в процессе формирования структуры вяжущей части или макроструктуры ИСК. В результате реакции возникают новые соединения, которых ранее не было в смеси, причем добавки или полностью расходуются, или утрачивают свои индивидуальные признаки. Понятно, что при избыточном количестве добавки могут частично остаться в смеси и в сформованном материале без каких-либо изменений, что не является желательным.

Распространенными являются порошкообразные добавки, по внешнему виду, а иногда и по химическому составу сходные с наполнителями. В качестве тонкомолотых активных минеральных добавок их вводят в состав неорганических, вяжущих веществ с целью придания им требуемых свойств, например способности к твердению в водной среде при добавлении к воздушной извести, повышенной водостойкости и стойкости против коррозии при добавлении к портландцементу или стойкости к воздействию высоких температур с сохранением прочности при добавках, вводимых в портландцемент, глиноземистый и некоторые другие вяжущие при производстве жаростойких бетонов, и т. д. Кислотостойкость материала повышают добавки из порошкообразного кварца, андезита, базальта и др. К другим распространенным порошкообразным добавкам относятся: из природных — осадочные горные породы (трепел, диатомит, опоки, магнезит и др.) или породы вулканического происхождения (пуццоланы, пемзы, туф, диабаз и др.); из искусственных — доменные гранулированные шлаки, зола-унос, нефелиновый шлам (побочный продукт алюминиевого производства), помол шамотного кирпича, обожженной глины (порошкообразный керамзит, агло-порит) и др. Все эти твердые добавки образуют с вяжущим новые, как правило, более сложные соединения типа силикатов кальция, алюминатов кальция и др.

Твердые добавки в смесях могут оставаться не только в состоянии нерастворимых минеральных порошков. Используют и такие твердые добавки, которые в смесях сравнительно легко образуют растворы или расплавы. Они относятся либо к катализаторам и ингибиторам (замедлителям), либо вступают в химические связи с компонентами смеси и создают новые фазы в процессе структурообразования. Их действие может привести также к преобразованию свойств поверхности компонентов, например к минерализации древесной дробленки и стружки путем экранирования поверхности пленкой нерастворимого вещества. Среди добавок этого действия — водорастворимые соли (средние и кислые), основания и другие электролиты и неэлектролиты.

Широкое распространение имеют жидкие добавочные вещества (добавки) — гомогенные или гетерогенные, как, например, водные дисперсии полимеров, или легко переводимые в жидкое состояние в виде истинных и коллоидных растворов, эмульсий, мыльных пен и др., именуемых как поверхностно-активные вещества (ПАВ). В этих органических соединениях молекулы имеют углеводородный радикал и полярную группу, обращаемую

при адсорбции к среде или твердой фазе, производя структурирующее воздействие в материале.

Поверхностно-активные вещества как добавки разделяют в основном на гидрофобизирующие и гидрофилизующие, что зависит от механизма их контактирования с вяжущими веществами и от конечного эффекта их взаимодействия — соответственно гидрофобизация (несмачиваемость водой) после воздействия первого и гидрофизация — после воздействия второго. Эти добавки способствуют также повышению морозостойкости и долговечности, что является следствием их способности, особенно при гидрофобизирующих добавках, к воздухововлечению при приготовлении смеси. Образуются замкнутые воздушные пузырьки, которые предохраняют разрушение материала при замерзании свободной воды, например, в бетоне с расширением льда. Вместе с тем практически не возникает водопроницаемости материала, так как количество воздушных пузырьков невелико (около 3—4%). Разновидностей ПАВ много, и они с большим эффектом используются в материалах для направленного структурообразования и обеспечения требуемых качественных показателей.

Добавки, вводимые в цементно-бетонную смесь, разделяют по эффекту их действия на бетонную смесь и бетон. Пластифицирующие, стабилизирующие, водоудерживающие добавки регулируют реологические свойства. Ускорители и замедлители схватывания теста, противоморозные добавки регулируют процессы твердения. Воздухововлекающие, газообразующие, пенообразующие, уплотняющие регулируют пористость бетона. Специальные добавки придают, как отмечалось выше, бетонам кислотостойкость, жаростойкость и др. Ряд добавок носит комплексный характер и выполняет одновременно несколько функций в бетонных смесях и бетоне.

9.4. ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ

9.4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БЕТОНАХ

Бетоны на основе неорганических вяжущих веществ представляют собой искусственные строительные конгломераты, получаемые в результате твердения рациональной по составу, тщательно перемешанной и уплотненной бетонной смеси из вяжущего вещества, воды и заполнителей. Кроме основных компонентов в состав бетонной смеси могут вводиться дополнительные вещества специального назначения. Среди других ИСК бетоны относятся к самым массовым по применению в строительстве вследствие их высокой прочности, надежности и долговечности при работе в конструкциях зданий и сооружений.

Кроме высокой прочности, у бетонов на основе неорганических вяжущих веществ имеется много и других достоинств: легкая формуемость бетонной смеси с получением практически любых наперед заданных форм и размеров изделий и конструкций, доступность высокой механизации технологических операций и т. п. Большая экономичность изделий из бетона состоит в том, что для их производства применяют свыше 80% объема местного сырья — песка, щебня, гравия, побочных продуктов промышленности в виде шлака, золы и др. По некоторым зарубежным данным, количество энергии, требующейся для производства бетонных материалов, является минимальным по сравнению с энергией (приведенной к единому эквиваленту), необходимой для изготовления стали, алюминия, стекла, кирпича, пластмасс. Для затворения порошкообразных вяжущих в тестообразное состояние и получения бетонной смеси используют обычную воду — питьевую из водопровода или речную, озерную и др. Расход воды также ниже, чем при производстве стали. После твердения тесто образует камень, например цементный камень (микроконгломерат), а уплотненная бетонная смесь — бетон (конгломерат). Часть объемов в бетоне, заполнителе и камне занимают поры и капилляры разного размера и в различном количестве.

Для бетонов применяют почти все разновидности неорганических вяжущих, в соответствии с чем бетоны разделяются на цементные, гипсовые, силикатные, шлаковые, специальные (на фосфатных, магнезиальных и других вяжущих). Для них используют также все разновидности заполнителей, вследствие чего бетоны разделяют на плотные, пористые, специальные. При объединении вяжущих и заполнителей в принятых по составу количествах получают множество технических решений при производстве искусственных строительных конгломератов различного назначения. Если этих двух компонентов окажется недостаточно, вводят дополнительные вещества (добавки). Еще более сильным фактором, которым пользуются при получении бетонов с заданными свойствами, является технология с ее многообразными операциями (переделами), режимами (тепловыми, механическими и пр.) и характеристиками оборудования и энергетики.

К одному из показателей заданных свойств относится средняя плотность бетона. Величина средней плотности бетона зависит от разновидности заполнителя, а отчасти обусловлена пористостью цементного камня. Особо тяжелые бетоны со средней плотностью свыше 2500 кг/м^3 получают при заполнителях в виде железной руды, барита, чугуна, скрапа, обрезков стали или чугуна и т. п. Тяжелые — средней плотностью $2200\text{—}2500 \text{ кг/м}^3$ — получают, применяя в них в качестве заполнителя щебень из плотных горных пород — гранита, диабазы, песчаника и др.; в состав облегченных бетонов со средней плотностью $1800\text{—}2200 \text{ кг/м}^3$ вводят керамзит, перлит, шлаки. В легких бетонах со средней плотностью $500\text{—}2000 \text{ кг/м}^3$ используют легкий заполнитель, природный или искусственный, в том числе пемзу, туфы, керамзит, аглопорит, вакулит и др.; нередко в них отсутствует песчаная фракция, вследствие чего возникают пустоты между щебнем, а сам бетон именуется крупнопористым легким бетоном. Особо легкие

бетоны (теплоизоляционные) со средней плотностью менее 500 кг/м^3 характеризуются наличием в них воздушных или газовых ячеек. Они именуются ячеистыми бетонами. При наибольшей крупности заполнителя до 10 мм — бетоны мелкозернистые, более 10 мм — крупнозернистые. При применении песка (крупность зерен до 5 мм) получают песчаные бетоны, также весьма необходимые в строительстве¹.

В зависимости от производственного назначения бетоны разделяют на конструкционные, предназначенные для изготовления бетонных и железобетонных внутренних и наружных конструкций промышленных и гражданских зданий и инженерных сооружений (колонны, балки, плиты и др.); гидротехнические — для строительства плотин, шлюзов, облицовки каналов и других гидротехнических сооружений; дорожные — для строительства дорожных и аэродромных оснований и покрытий; специальные — при устройстве жароупорных покрытий, изготовления кислотоупорных изделий и т. п. Каждой разновидности бетона присущи свои особенности: гидротехнический должен быть предельно плотным, водонепроницаемым, морозостойким, стойким против коррозии, тогда как бетон для жилищного строительства, тем более ограждающих конструкций (стен, перекрытий), должен быть малотеплопроводным, поддерживать и сохранять хорошую звукоизоляцию и пр., а бетоны дорожные должны быть не только морозостойкими, но и устойчивыми к динамическим воздействиям транспортных нагрузок, к истираемости и износу под колесами автомобиля в сложных климатических условиях.

В соответствии с ГОСТ 25192—82 основным показателем качества бетонов является предел прочности при одноосном сжатии образцов-кубов с ребром 15 см с разделением их на классы В или предел прочности при сжатии цилиндрических образцов размером 15х30 см с разделением бетонов на классы С. Эти показатели качества обоих классов принимаются по стандарту с гарантированной обеспеченностью. Марка бетона нормируется по среднему значению показателя прочности на сжатие, тогда как класс бетона нормируется с гарантированной обеспеченностью прочности. Важное значение в классификации по прочности и другим показателям качества отводится определению показателя однородности бетона.

Всего предусмотрено классов по прочности на сжатие при испытании кубов 15х15х15 см — 19 (от В1 до В60), при испытании цилиндров 15х30 см — 19 (от С0,8 до С55); все значения прочности выражаются в МПа. Марки бетонов выражаются в кгс/см^2 : от 15 (для ячеистых бетонов) до 600 и более (для тяжелых бетонов). Как отмечалось выше, основное деление принято в настоящее время по классам, но допускаются и марки бетонов.

Существенным недостатком бетона различных классов и различной плотности является невысокая сопротивляемость растягивающим (изгибающим) напряжениям. Она в 12—15 раз ниже прочности бетона при сжатии.

¹ Львович К. Песчаный бетон: родина — Россия // Стройка. 2000. 34.

9.4.2. ТЯЖЕЛЫЕ (ОБЫЧНЫЕ) БЕТОНЫ

Исходные материалы. При выборе разновидности цемента учитывают характер конструкции и рекомендации нормативных документов (ГОСТа, СНиПа). Так, например, при производстве железобетонных конструкций промышленных зданий и многих инженерных сооружений, работающих в условиях воздушно-сухой среды, применяют портландцемента с повышенным содержанием алита. Если эти конструкции относятся к массивным, то более предпочтительны цементы с меньшим содержанием алита, которые меньше выделяют теплоты при реакциях твердения и, следовательно, в меньшей мере конструкции подвержены тепловым неравномерным напряжениям. Если конструкция работает в условиях воздействия морской или другой минерализованной воды, тогда выбирают ма-лоалюминатные сульфатостойкие портландцементы и шлакопортландцементы. Гидротехнические сооружения проектируют и строят с применением сульфатостойких портландцементов с пластифицирующими и гидрофобными добавочными веществами. Аналогичным образом учитывают условия при выборе цемента для других видов бетона.

Кроме выбора разновидности вяжущего обосновывают также выбор его марки, исходя из требуемой прочности бетона в конструкциях и минимального расхода вяжущего как наиболее дорогостоящего компонента бетона, избыток которого увеличивает величину усадочных деформаций, а потому и снижает трещиностойкость бетона. Обычно исходят из соотношения, чтобы марка по прочности цемента превышала на 10—40% марку бетона, а при низких марках бетона (110—300) превышение марки цемента составляет 100—200%. Но такие соотношения являются приблизительными, так как определение марок цемента и бетона по стандартам производится при различных условиях подготовки соответствующих смесей и при несходных структурах испытываемых материалов. Именно поэтому часто фактически прочность бетона получается на одну-две марки выше марки принятого цемента. Чтобы избежать случайности, следует при выборе цемента и расчетах исходить не из марки, а реальной активности (R^*) при оптимальной структуре, в теории ИСК именуемой расчетной активностью. Она соответствует прочности цементного камня оптимальной структуры, полученной при испытании образцов, изготовленных при технологических параметрах и режимах, характерных для принятого или предполагаемого производства бетона и изготовления бетонных изделий. При проектировании состава бетона общим методом (см. 3.4) можно достаточно точно обусловить выбор расчетной активности цемента с учетом реальной технологии, реальных заполнителей и возможных добавок, в частности, пользуясь формулой (9.3). Строгие требования предъявляются к качеству воды, используемой при затворении бетонной смеси, а также для промывки заполнителей и увлажнения бетона при его твердении в сухих условиях. Рекомендуется применять питьевую воду; не допускаются болотные и сточные воды. Ограничивается содержание растворенных в воде солей, органических веществ, вовсе не допускаются примеси нефтепродуктов, проверяется водородный показатель pH, который не должен быть ниже 4,0 и выше 12,5.

Для тяжелых бетонов предусмотрены требования к качеству заполнителей. Пески используют природные или получаемые дроблением плотных морозостойких горных пород с размером зерен не крупнее 5 мм. Важно обеспечить повышенную плотность зернового состава (по кривым плотных смесей) при модуле крупности не ниже 2,0. Ограничивается содержание пылевато-глинистых и других вредных примесей, о чем указывалось выше при описании заполнителей. На стадии проектирования состава бетона устанавливают целесообразный зерновой состав крупного заполнителя с наименьшим

объемом пустот и наибольшей крупностью зерен при общих требованиях, указанных выше в отношении качества заполнителей¹.

Широко используют в технологии бетона пластифицирующие, воздухововлекающие и противоморозные добавки.

Определение состава бетона. Одной из основных технологических задач является проектирование состава бетонной смеси. Разработан ряд методов проектирования состава, имеются официальные руководства, облегчающие решение этой задачи. Каждый раз необходимо выбирать тот метод проектирования (или подбора), который при принятой технологии способен обеспечить получение наиболее достоверного состава и оптимальной структуры бетона. Тогда формируется качество бетона, при котором имеется не только комплекс заданных, но и экстремальных показателей свойств, что соответствует закону створа. При всех методах на начальной стадии производится обоснованный выбор исходных материалов, чему способствуют табличные данные и вспомогательные графики, помещаемые в соответствующие руководства по подбору составов. В них выбор исходных материалов обусловлен проектной маркой (классом) бетона, разновидностью конструкций и эксплуатационными условиями с учетом не только прочности, но и морозостойкости, водонепроницаемости и других свойств. На втором этапе всех методов проектирования с помощью расчетов и опытов в лаборатории определяют количественные соотношения применяемых исходных материалов. Важно найти наиболее достоверные и закономерные способы определения таких соотношений с гарантией получения бетона не только необходимого качества по показателям свойств, но и оптимальной структуры. На третьем этапе в методах обычно предусмотрен выпуск пробного замеса бетонной смеси и более полная техническая характеристика качества этой смеси с возможным корректированием (уточнением) проектного состава.

Изложенный в теории ИСК общий метод проектирования состава и оптимальной структуры в полной мере, естественно, относится к тяжелому и другим видам цементных бетонов. Принятое в общем методе отношение с/ф становится водоцементным (В/Ц) или водо-твердым при более сложном вяжущем веществе.

Ниже изложен общий метод применительно к тяжелому плотному цементному бетону, но вначале следует уточнить общие закономерности из теории ИСК, на которые опирается этот метод. Среди законов видное место занимает закон створа (см. рис. 3.13), а в отношении механических свойств действует закон прочности оптимальных структур: произведение прочности бетона на степенную функцию фазового отношения (В/Ц) есть величина постоянная. Такой постоянной величиной служит аналогичное произведение прочности цементного камня на его водоцементное отношение при оптимальной структуре, возведенное в ту же степень, т. е. $R^* \cdot (В/Ц^*)^n$. Прочность R^* цементного камня оптимальной структуры находится опытным путем при испытании образцов, хотя возможен и расчетный метод по формуле Фере: $R = K[c/(c+e+a)]^2$, где K — константа; c , e , a — абсолютные объемы соответственно цемента, воды и воздуха в смеси. Как отмечал А.В. Волженский [8], было бы более целесообразно в формуле принять абсолютный объем новообразований цемента с учетом объема гелевых пор (Т. Пауэре. М., 1955).

Показатель степени n в обоих случаях отражает влияние заполняющих компонентов и общую степень дефектности структуры бетона.

Из закона прочности оптимальных структур и общей формулы (3.1) следует и общая формула прочности бетонов:

$$R_{\delta} = R_{Ц}^* / x^n, \quad (9.3)$$

где R_{δ} — прочность цементного бетона оптимальной структуры, выраженная любой ее характеристикой (предел прочности при сжатии, предел прочности при растяжении

¹ Более полные сведения о заполнителях для тяжелого и легкого бетонов см. в ж. «Стройка», 2000, № 5, с. 139—141.

центрального или изгибе и т. п.); $R_{ц}^*$ — прочность цементного камня оптимальной структуры, выраженная той же характеристикой, которая была принята для оценки прочности цементного бетона (и в том же возрасте); x — отношение фактической величины В/Ц бетона к В*/Ц цементного камня оптимальной структуры; оно равно отношению усредненных толщин (δ ; δ^*) пленок водной среды в свежееизготовленных материалах, т. е. $x = В/Ц / В^*/Ц = \delta/\delta^*$; n — показатель степени, отражающий влияние качества заполняющих материалов, дефектов структуры на прочность бетона; R^* — экстремум в зависимости $R = f(В/Ц)$, определяется опытным путем.

Для исходных материалов, применяемых в цементном бетоне, и принятой технологии изготовления бетона с ее конкретными параметрами и режимами все члены формулы (9.3) имеют вполне определенный физический смысл. Из формулы следует, что повышения прочности бетона можно достигнуть, во-первых, путем всемерного увеличения $R_{ц}^*$ — введением химических добавок типа катализаторов или поверхностно-активных веществ, увеличения содержания кристаллической фазы на стадии твердения, дополнительным помолом, переходом на более высокие марки вяжущего и др. Из формулы (9.3) следует также, что для той же цели требуется уменьшать значение реального В/Ц и показателя степени n . Первое достигается с помощью пластифицирующих и суперпластифицирующих добавок, интенсификацией перемешивания смеси или другими мерами, снижающими толщину пленок водной среды на твердых частицах цемента или другого вяжущего; второе достигается фракционированием и промывкой заполнителя, составлением плотных смесей, применением кубовидного крупного заполнителя, активированием поверхности зерен и т. п. Большой резерв повышения прочности заключается в оптимизации технологических переделов, особенно режимов уплотнения при формовании и тепловых режимов при обработке отформованных изделий и конструкций.

Формула (9.3) графически выражается гиперболической кривой в прямоугольной системе координат (R , В/Ц). Понятно, что этот график (рис. 9.7) аналогичен графической зависимости для любых ИСК (см. рис. 3.15, б). Однако на рис. 3.15, б отсутствует третья плоскость и соответственно ось аппликата (В+Ц) или (П+Ц), показанная на рис. 3.8 в виде (с+ф) и на рис. 3.15, а.

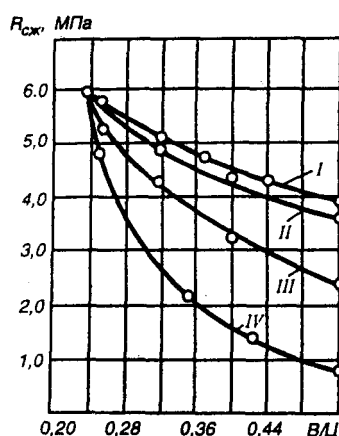


Рис. 9.7. Гиперболические кривые прочности бетонов оптимальной структуры; интенсивность спада прочности зависит от заполнителя: I — прочный известняк; II — гранитный щебень; III — керамзитовый гравий; IV — природный гравий (необработанный)

На плоскости $R(В+Ц)$ ей соответствует формула прочности бетона оптимальной структуры:

$$R_{\sigma} = \frac{k \cdot R^*}{\left(\frac{100}{B + Ц}\right)^m}. \quad (9.4)$$

Ее можно также выразить не процентах, а в долях единицы.

Объединением формул (9.3) и (9.4) получена формула (9.5) в полном виде:

$$R_{\sigma} = \frac{k \cdot R^*}{\sqrt[n]{\left(\frac{B / Ц}{B^* / Ц}\right)^n \cdot \left(\frac{100}{B + Ц}\right)^m}}. \quad (9.5)$$

В ней нашли отражение все основные факторы, влияющие на величину прочности при воздействии на бетон практически любых напряжений (сжатия, растяжения, сдвига и др.), а именно: содержание вяжущего вещества (В+Ц), а следовательно, и заполняющей части П+Щ = 100 — (В+Ц), % по массе; водоцементное отношение В/Ц; качество (расчетная прочность) вяжущего вещества оптимальной структуры R^* ; пористость k , %; качество заполнителя по отношению к принятому вяжущему веществу и (В+Ц) (степенной показатель n); жесткость бетона или количество заполнителя, а следовательно и (В+Ц) (показатель t); технологические параметры и режимы; эффективность добавочных веществ (добавок), отражающаяся на значениях $B^*/Ц$ и R^* . Отсюда следует, что на технологической стадии безусловно возможно и необходимо регулировать и управлять числовым значением прочности и других свойств, но при непрерывной оптимизации структуры, соответствующей реальной технологии бетона. Только при ней действуют общие и объективные законы ИСК.

Здесь необходимо снова вернуться к формуле (3.13), которая применительно к бетонам выглядит так:

$$R_{\sigma} = k_3 \cdot R_{Ц}^* M^{m/2}, \quad (9.6)$$

где $M = B + Ц$ — цементное тесто в долях единицы (по массе). Из формулы по-прежнему видно, что важно всемерно увеличивать расчетную величину активности матричного (вяжущего) вещества с соответственным уменьшением значения M , что после вычисления требуемого водоцементного отношения по формуле (9.6) адекватно уменьшению расхода цемента в бетоне (в $кг/м^3$) до рационального минимума. Последний обычно обусловлен высокой плотностью и морозостойкостью бетона. При оптимальных структурах все эти параметры качества бетона находятся в теснейшей взаимосвязи.

После уточнения формул прочности ИСК применительно к бетону целесообразно изложить последовательность проектирования состава тяжелого цементного бетона, в том числе с использованием компьютерной программы.

1. Определение расчетной активности цементного камня R^* как матричной части бетона и минимального значения фазового отношения $B^*/Ц$, обеспечивающего, при принятых технологических условиях, оптимальную структуру. Для этого из цементного теста с 3—4 различными В/Ц, отличающимися между собой на величину 0,02—0,03, изготавливают образцы-кубики размером 10х10х10 см путем уплотнения их способом, принятым в технологии производства проектируемого изделия¹. В качестве исходного может быть принято В/Ц, соответствующее нормальной густоте цементного теста. После графического построения функции $R = f(B/Ц)$ находят и уточняют искомое значение $B^*/Ц$ при наибольшей прочности цементного камня R^* .

¹ Для прикидочных опытов размеры образцов могут быть приняты и меньших размеров, например 2х2х2 см в целях экономии вяжущего вещества.

2. Определение состава плотной смеси песка (П) и щебня (Щ). Сосуд объемом 2 л заполняют мокрым щебнем и уплотняют способом, принятым в технологии. После установления стабильного уровня щебня сосуд взвешивают, определяя фактическую массу щебня. Затем в сосуд постепенно добавляют заранее взвешенный и смоченный водой песок, который заполняет пустоты между зернами щебня при непрерывной вибрации. После полного заполнения пустот песком определяют массу сосуда с щебнем и песком, находящимся в пустотах крупного заполнителя, тем самым устанавливая оптимальное соотношение по массе. Полнота заполнения пустот щебня песком возрастает при применении мокрых материалов и определяется по максимальной массе смеси (см. рис. 3.14).

3. Определение оптимального количества исходных материалов в бетонной смеси. С этой целью выполняют две последовательно чередующиеся операции: вспомогательную и основную.

Вспомогательная операция является экспериментальной, необходимой для определения показателей степени n и m , используемых в формулах прочности и составов.

По лабораторным данным строят кривую оптимальных структур (см. рис. 3.15) при произвольно выбранном значении $(B/C)_A$ и находят в точке A величину R_A на кривой DBE , а также значение $(B/C)_B$ в точке B . Прочность R_A имеется и на кривой KL , которой к началу экспериментов хотя еще и нет, но о ее вероятном существовании, как и кривой оптимальных структур из теории ИСК, известно. И тогда полученных данных R_A , $(B/C)_B$, $(B/C)_A$ достаточно, чтобы определить значения показателей степени лит согласно вышеприведенным формулам, поскольку другие требуемые значения $R_{л}^*$ и B^*/C ранее были определены (на первом или втором этапах проектирования). Важно помнить, что величина m_x — переменная и при новых B/C или R требует уточнения.

Основная операция второго этапа проектирования оптимального состава бетона (как и всех других ИСК) является расчетной, причем сначала рассчитывают расход материалов (Ц, В, П, Щ) в % по массе на 1 тонну смеси, а затем пересчитывают в % по массе на 1 м³ бетонной смеси или 1 м³ бетона, например в абсолютно плотном теле.

Последовательность (алгоритм) расчета

Искомое водоцементное отношение:

$$(B/C)_{иск} = B^*/C \cdot \sqrt[n]{R/R_{зад}}, \text{ где } n = \frac{\lg\left(\frac{R^*}{R_A}\right)}{\lg\left(\frac{B/C_A}{B^*/C}\right)}.$$

Искомый расход цементного теста:

$$(B+C)_{иск} = \frac{100}{\left[\frac{(B/C)_{иск}}{B^*/C}\right]^{n/m_x}},$$

где показатель степени m_x отличается от ранее полученного значения m , так как определяется при новом значении $(B/C)_{иск}$, а не при прежнем $(B/C)_A$, а именно:

$$m_x = m \cdot \frac{(B/C)_{иск}}{(B/C)_A}.$$

Количество цемента на 1 т смеси:

$$C = \frac{(B+C)_{иск}}{1 + (B/C)_{иск}} \cdot 10 \text{ кг/т.}$$

Количество воды на 1 т смеси

$$B = \frac{(B + Ц)_{иск} \cdot (B / Ц)_{иск}}{1 + (B / Ц)_{иск}} \cdot 10 \text{ кг/т.}$$

Количество песка и щебня определяют из условия:

$$П + Щ = 100 - (B + Ц)_{иск}$$

при ранее найденном значении П/Щ, а именно:

$$П = \frac{(П + Щ) \cdot П / Щ}{1 + П / Щ} \cdot 10 \text{ кг/т} \text{ — количество песка,}$$

$$Щ = \frac{П + Щ}{1 + П / Щ} \cdot 10 \text{ кг/т} \text{ — количество щебня}^1.$$

Пересчет расхода материалов на 1 м³ бетонной смеси (без учета воздушных пор) производится в следующей последовательности.

Определяем абсолютные объемы всех материалов (при условии, что известны истинные плотности $\rho_{ц}$, $\rho_{в}$, $\rho_{п}$, $\rho_{щ}$, взятые в количествах для образования 1 т смеси):

$$\frac{10B}{\rho_{в}}; \frac{10Ц}{\rho_{ц}}; \frac{10П}{\rho_{п}}; \frac{10Щ}{\rho_{щ}}.$$

Пишем соотношение:

если сумма $\frac{10B}{\rho_{в}} + \frac{10Ц}{\rho_{ц}} + \frac{10П}{\rho_{п}} + \frac{10Щ}{\rho_{щ}}$ соответствует 1000 кг, а 1000 л соответствует x

кг, то

$$x = \frac{1000 \cdot 1000}{\frac{10B}{\rho_{в}} + \frac{10Ц}{\rho_{ц}} + \frac{10П}{\rho_{п}} + \frac{10Щ}{\rho_{щ}}} \text{ кг/м}^3.$$

И тогда расход материалов на 1 м³ бетонной смеси:

цемента Ц · x кг;

воды В · x кг;

песка П · x , кг;

щебня Щ · x кг.

Контрольная проверка на плотность:

$$\frac{B_x}{\rho_{в}} + \frac{Ц_x}{\rho_{ц}} + \frac{П_x}{\rho_{п}} + \frac{Щ_x}{\rho_{щ}} = 1000 \text{ л}^2.$$

На третьем этапе проектирования рассчитывают расход материала при производственном составе, т. е. с учетом влажности песка и щебня; изготавливают контрольный замес (лучше в производственных условиях, применительно к которым были приняты технологические параметры и режимы формования и хранения) и образцы с оценкой свойств бетона в требуемом (обычно в 28-дневном) возрасте. Последнее производят с учетом известного логарифмического закона. На этом этапе завершается проектирование³; состав передается заводу.

Приведенный выше метод расчета состава бетона оптимальной структуры легко и быстро выполняется, если воспользоваться одной из компьютерных программ, а именно Microsoft EXCEL, таблица которой состоит из бесчисленного количества строк (1, 2, 3...) и колонок

¹ Все найденные значения Ц, В, П и Щ умножены на 10 потому, что в 1 тонне (1000 кг) каждый 1% составляет 10 кг. Поэтому Ц% составляет Ц 10 кг, и т. д.

² Если сумма окажется больше или меньше 1000, то надо искать в расчетах арифметическую ошибку.

³ Проектирование оптимального состава может осуществляться и по другим качественным требованиям к бетону: средней плотности, морозостойкости и т. д.

(А, В, С, D...). Разместив в колонке «А» наименования показателей свойств, а в колонке «В» соответствующие показатели этих свойств и формулы, необходимые для расчета, можно составить программу, удобную для расчета многих составов бетона с оптимальной структурой (табл. 9.6). Числовой пример — в столбце С.

Таблица 9.6. Последовательность расчета состава бетона оптимальной структуры с использованием Microsoft EXCEL

	А	В	С
1	$R_{зад}$, МПа		17,5
2	$B^*/Ц$		0,25
3	R^* , МПа		32,2
4	П/Ц		0,55
5	R_A		20,4
6	$(B/Ц)_A$		0,55
7	$(B+Ц)_A$, %		20
8	n	$= (LOG(B3/B5))/(LOG(B6/B2))$	0,58
9	$(B/Ц)_{иск}$	$= B2*((B3/B1)^{(1/B8)})$	0,72
10	m_x	$= (LOG(B3/B5))*B9/((LOG(100/B7)*B6)$	0,37
11	$\rho_{ц}$, г/см ³		3,1
12	$\rho_{п}$, г/см ³		2,4
13	$\rho_{ш}$, г/см ³		2,5
14	$(B + Ц)_{иск}$, %	$= 100((B9/B2)^{(B8/B10)})$	19,21
15	$\rho_{бс}$, кг/м ³	$= \frac{1000000}{((10*B14/(1+B9)*B1 + 1)) + (10*B14*B9/(1+B9)) + (10*(100-B14)*B4)/((1+B4)*B12)) + B14)/((1+B4)*B13))}$	2251,05
16	$Ц_3$, кг на 1 м ³	$= B14*B15/((1+B9)*100))$	251,87
17	B_3 , кг на 1 м ³	$= B14*B9*B15/((1+B9)*100))$	180,54
18	$П_3$, кг на 1 м ³	$= (100-B14)*B4*B15/((1+B4)*100))$	645,33
19	$Ш_3$, кг на 1 м ³	$= (100-B14)*B15/((1+B4)*100))$	1173,32

Компьютерный метод расчета обладает большой наглядностью. Применение его позволяет после внесения в таблицу расчетных формул:

мгновенно получить результаты с любой заданной точностью;

исключить ошибки, которые довольно часто возникают при работе с калькулятором;

одновременно выполнять расчеты нескольких составов бетона при изменении свойств исходных материалов;

наблюдать за влиянием отдельных факторов на результаты расчета и анализировать их.

В настоящее время пока еще распространен подбор состава тяжелого бетона по методу «абсолютных объемов», разработанному Б.Г. Скрамтаевым и его научной школой.

На первом этапе принимают исходные данные в отношении проектного класса бетона по прочности и другим свойствам. Для обоснования данных используют технические документы — проект здания или сооружения, проект бетонных элементов, проект организации работ, СНиП и другую проектную и нормативную документацию. Существенной характеристикой бетонной смеси (в зависимости от проектных и производственных условий) принимается подвижность, выражаемая в сантиметрах, или жесткость, выражаемая в секундах, и определяемые по ГОСТ 10181—81. Производится выбор заполнителей, возможных фракций при их разделении (классификации), а также размера наибольшего

зерна (щебня или гравия) в зависимости от вида конструкции и способа укладки бетонной смеси. Обосновываются вид и марка цемента, его минимально допустимое количество в зависимости от условий работы конструкции и подвижности (жесткости) бетонной смеси. Обусловливается рекомендуемый расход воды в зависимости от подвижности бетонной смеси, вида и крупности заполнителя, а именно: чем меньше жесткость (выше пластичность) смеси и мельче наиболее крупный размер щебня (гравия), тем больший расход воды рекомендуется принимать в бетонной смеси, выражаемый в л/м³.

На втором этапе определяют состав бетона расчетно-экспериментальным способом в такой последовательности: а) определяют водоцементное отношение (В/Ц) по данным предварительных опытов, которые помогают установить графическую зависимость прочности бетона от В/Ц при данной активности цемента и применении принятых местных заполнителей (табл. 9.7). Чаще, однако, пользуются формулой, которая следует из формулы прочности Боло-мея—Скрамтаева:

$$\text{при } В/Ц > 0,4 \quad В / Ц = \frac{AR_{Ц}}{R_{б} + 0,5AR_{Ц}}, \quad (9,7)$$

$$\text{при } В/Ц < 0,4 \quad В / Ц = \frac{A_1R_{Ц}}{R_{б} - 0,5A_1R_{Ц}}; \quad (9,7)$$

Таблица 9.7. Значения коэффициентов А и А₁

Заполнители бетона	А	А ₁
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,60	0,40
Пониженного качества	0,55	0,37

б) определяют расход воды (В) по требуемой подвижности бетонной смеси на основании результатов предварительных испытаний или по таблице, но с обязательным последующим корректированием применительно к исходным материалам (рис. 9.8);

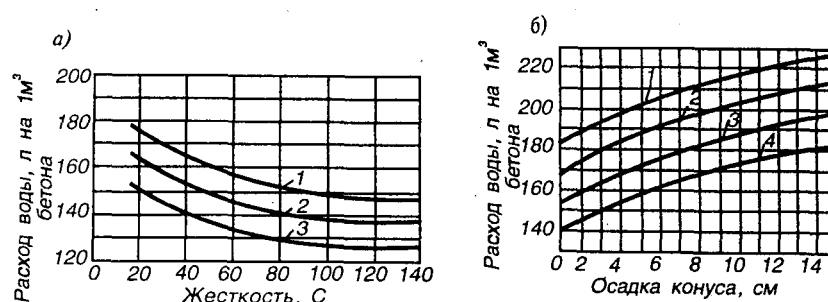


Рис. 9.8. График водопотребности бетонных смесей жестких (а) и пластичных (б), приготовленных с применением портландцемента, песка средней крупности и гравия наибольшей крупности: 1 — 80 мм; 2 — 40 мм; 3 — 20 мм; 4 — 10 мм (при использовании вместо гравия щебня расход воды увеличивают на 10 л. При использовании пуццоланового портландцемента расход воды увеличивают на 15—20 л. При применении мелкого песка расход воды увеличивают на 10—20 л)

в) находят расход цемента (Ц): Ц = В:В/Ц. Может оказаться, что полученная величина расхода цемента на 1 м³ бетона ниже допустимого нормами минимума и принятого по таблицам на первом этапе подбора. Тогда величину Ц увеличивают до требуемой нормы с соответствующим увеличением количества воды В, с тем чтобы неизменным оставалось

расчетное водоцементное отношение. Следует отметить, что минимально допустимый расход цемента для бетонных конструкций 200 кг/м³, для железобетонных — 220 кг/м³;

г) по полученным значениям В/Ц и Ц устанавливают так называемый коэффициент раздвижки (α) зерен щебня или гравия, который вводят в расчеты для увеличения количества песка, чтобы повысить подвижность бетонной смеси за счет отдаления (раздвижки) зерен щебня или гравия друг от друга. Чем выше требуемая пластичность бетонной смеси, тем дальше должны быть отдалены зерна щебня и, следовательно, больше величина α . Она возрастает также при увеличении расхода цемента и принимается: для подвижных смесей — 1,25—1,55, для жестких бетонных смесей — 1,05—1,15;

д) определяют расход щебня (или гравия) по формуле

$$\Pi = \frac{1000}{\frac{\alpha V_{\text{пуст.}\Pi}}{\rho_{\text{нас.}\Pi}} + \frac{1}{\rho_{\Pi}}}; \quad (9.9)$$

е) определяют расход песка по формуле

$$\Pi = (1000 - \Pi / \rho_{\Pi} - B - \Pi / \rho_{\Pi}) \cdot \rho_{\Pi}. \quad (9.10)$$

В двух последних формулах $v_{\text{пуст}} = 1 - (\rho_{\text{щ}} / \rho_{\Pi})$; ρ_{Π} , ρ_{Π} и ρ_{Π} — истинные плотности соответственно цемента, песка и щебня; $\rho_{\text{нас.}\Pi}$ — насыпная плотность крупного заполнителя (щебня или гравия).

Формулы нетрудно выводятся из условий, что сумма абсолютных объемов исходных материалов в 1 м³ уплотненной бетонной смеси близка к 1000 л и что объем пустот в

щебне $V_{\text{пуст.}\Pi} \cdot \frac{\Pi}{\rho}$ заполняется суммой объемов песка, цемента и воды при некоторой

раздвижке крупных зерен (что учитывается множителем α).

После определения количества компонента расчетная средняя плотность бетонной смеси равна $\rho_{\text{б.с}} = \Pi + \Pi + \Pi + B$ (кг/м³). У тяжелых бетонов величина $\rho_{\text{б.с}}$ обычно не превышает 2500 кг/м³.

На третьем этапе подбора проверяют проектный состав бетона. С этой целью готовят пробный замес и определяют подвижность или жесткость бетонной смеси. Если величина этой характеристики окажется на уровне заданной, то из смеси изготавливают контрольные образцы из расчета не менее трех на каждый срок испытания. Их хранят в течение суток в помещении при температуре 16—20°C, а оставшееся время до испытания — в специальной камере или в нормальных температурно-влажностных условиях (температура 20°C; влажность воздуха 95—100%). Если величина подвижности окажется меньше заданной, то постепенно увеличивают содержание воды и цемента в бетонной смеси, сохраняя постоянным водоцементное отношение. Если подвижность окажется больше заданной, то в бетонную смесь добавляют песок и щебень (или гравий), сохраняя их отношение по массе. Получив величину подвижности на уровне заданной, изготавливают пробные образцы, выдерживают и испытывают их для проверки соответствия прочности и других свойств бетона заданным техническим требованиям.

Состав бетона представляют в двух выражениях: номинальном и производственном. Номинальный — это когда расходы материалов на 1 м³ бетонной смеси относят к расходу цемента в виде Ц/Ц:П/Ц:Щ/Ц = 1:П/Ц:Щ/Ц. Данная пропорция показывает, сколько частей сухого песка и сухого щебня приходится на 1 часть (по массе) цемента при приготовлении 1 м³ бетона. Обязательно указывают также величину В/Ц. Переход от номинального состава к производственному связан с учетом естественной влажности заполнителей. Для этого определяют влажность и реальное содержание влаги (воды) в песке и щебне. Эту воду вычитают из расчетного расхода воды, а при дозировании на заводах ее засчитывают

с массой заполнителей, к которым добавляют их массу, равную соответствующим массам воды в сырых заполнителях.

Приготовление бетонной смеси и ее свойства. Запроектированный номинальный состав, пересчитанный на производственный состав бетонной смеси, передают на завод для изготовления изделий или конструкций. На бетонном заводе в соответствии с заданным составом производится дозирование путем отвешивания (реже - объемного отмеривания) принятых исходных материалов — цемента, песка, щебня, воды и др. Дозирование осуществляют с помощью автоматических, реже ручных дозаторов. Порции материалов по проектному составу направляют в бетоносмесительные машины с принудительным или свободным (гравитационным) смешиванием отдозированных материалов. Емкости бетоносмесителей колеблются от 100 до 250 л в передвижных (рис. 9.9) и от 250 до 4500 л в стационарных установках (рис. 9.10). Чем менее подвижными, жесткими ожидаются смеси, тем целесообразнее использовать принудительное перемешивание, осуществляемое с помощью противоточных или роторных бетоносмесителей. Главным смешивающим органом в них служат лопасти или лопатки, а смесь размещается в горизонтальных чашах при периодическом выпуске смеси или в цилиндрических барабанах — при непрерывном действии смесителя. Бетоносмесители непрерывного действия имеют большую производительность (до 120 м³/ч) и меньшую удельную затрату электроэнергии, чем бетоносмесители периодического действия.

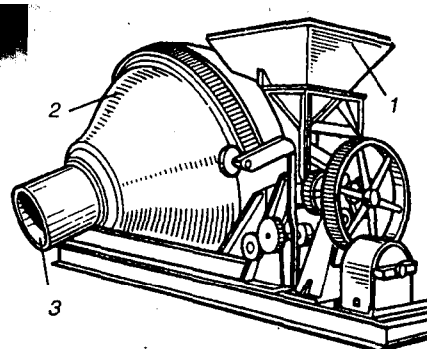
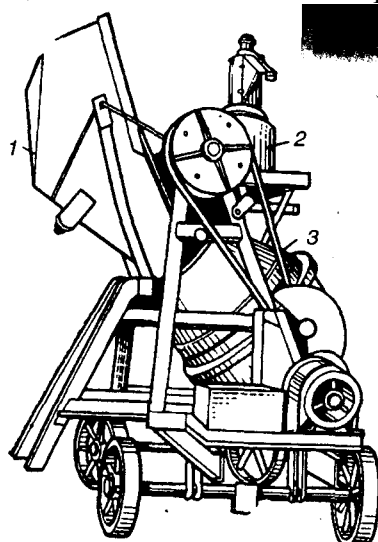


Рис. 9.10. Бетоносмеситель стационарный:
1 — бункер; 2 — барабан; 3 — выгрузочное отделение

Рис. 9.9. Бетоносмеситель передвижной:
1 — ковш; 2 — бак для воды; 3 — барабан

При изготовлении мелкозернистых и песчаных бетонных смесей нередко используют и другие типы смесителей, например шнековые с приводным горизонтальным валом, размещенным вдоль лотка, или струйные непрерывного действия с перемешиванием в «кипящем» слое в зоне электрического поля во встречных потоках противоположно направленных струй сжатого воздуха. Процессы дозирования, загрузки и перемешивания контролируют электропневматической системой, особенно на стационарных заводах.

Хорошо перемешанная, однородная бетонная смесь выгружается в бункер или транспортную емкость (автомобильные вагонетки, бады, бетононасосы, трубопроводы и др.). Если смесь обладает высокой пластичностью, то в пути следования к месту ее укладки предусматриваются специальные меры для предотвращения расслаивания, например дополнительное перемешивание или транспортирование сухой смеси с внесением расчетной порции воды в пути следования к объекту, введение добавочных веществ — минеральных, пластифицирующих и др.

При выходе из смесительного аппарата фактический объем бетонной смеси значительно меньше суммы объемов применяемых материалов, как компонентов смеси. Так, если сумму объемов исходных сухих материалов бетонной смеси обозначить как $x+y+z$, то фактический объем (V_0) бетонной смеси составит $V_0 = r(x+y+z)$, где $r < 1$ называется коэффициентом выхода бетона. В зависимости от состава бетона коэффициент выхода

колеблется в пределах от 0,55 до 0,75. Такое снижение фактического объема бетона по сравнению с суммой объемов сухих материалов объясняется тем, что часть песка и тем более цемент размещаются в межзерновом пространстве крупного заполнителя. При назначении емкости бетоносмесителя необходимо принимать не менее суммы объемов сухих материалов, т. е. $(x+y+z)$ литров, так как поступающие сухие материалы занимают до перемешивания объем, почти равный сумме их объемов в отдельности. С учетом коэффициента выхода рассчитывают количество (n) замесов в бетоносмесителе данной емкости (a) для получения определенного количества бетонной смеси (B), а именно: $n = B/(ra)$.

Подобно другим конгломератным смесям, бетонная представляет собой дисперсную систему, в которой в роли дисперсионной среды выступает цементное тесто, а твердой дисперсной фазой является механическая смесь мелких и крупных заполнителей. Если при необходимости в бетонную смесь были добавлены порошкообразный наполнитель или иной микродисперсный компонент, растворимый или нерастворимый в воде, то они, являясь по размеру частиц соизмеримыми с частицами цемента, относятся к дисперсионной среде. Понятно, что эта среда является микрогетерогенной, поэтому после отвердевания в бетоне она образует цементный камень сложного состава, называемый, по выражению проф. В.Н. Юнга, микробетоном. На стадии проектирования состава бетонной смеси предусматривается, чтобы все компоненты в бетонной смеси находились на возможно более малых расстояниях друг от друга, с тем чтобы на микро- и макроуровнях полнее проявлялись внутренние силы взаимодействия частиц. Особенно важно, чтобы была обеспечена оптимизация структуры бетонной смеси, при которой цементное тесто образует непрерывную пространственную сетку (матрицу) в смеси при минимальном отношении массы жидкой (B) и твердой ($Ц, T$) фаз ($B/Ц$ или B/T) и принятых технологических условиях изготовления и применения бетонной смеси. Если снижение этого фазового отношения продолжить, то неизбежно образование дискретности (прерывистости) пленки водной среды на высокоразвитой поверхности частиц цемента и других микронаполнителей. Оптимизация заключается и в том, что полученная бетонная смесь однородна по пространственному расположению в ней микро- и макрочастиц. Кроме того, заполнители образуют достаточно плотную смесь, что желательно для снижения расхода вяжущего вещества и стоимости бетона.

Бетонная смесь направляется для формования из нее изделий или конструкций (монолитных или сборных). Если параметры последующих технологических операций (транспортирования, формования, уплотнения) с бетонной смесью были учтены на стадии проектирования ее состава, то эти операции не вызывают каких-либо неожиданностей в поведении смеси. Она транспортируется без расслаивания и разрывов в потоке, формуется и уплотняется без необходимости увеличения или снижения интенсивности механических воздействий, кроме тех, которые были учтены на стадии проектирования состава бетонной смеси. Минимум неожиданностей возникает на стадии тепловлажностной обработки отформованных изделий и конструкций, поскольку реальные ее режимы были по возможности учтены на стадии проектирования состава бетона.

Однако в производственных условиях всегда возможны отклонения от технологических параметров и режимов, принятых при проектировании состава смеси. В результате таких отклонений бетонная смесь может оказаться недостаточно подвижной и удобообрабатываемой на какой-либо стадии производственного цикла. Особенно важно иметь подвижные смеси при изготовлении армированных изделий. Чтобы уменьшить связанные с этим технологические дефекты в изделиях (конструкциях), контролируют реологические характеристики бетонной смеси. Простейшими и имеющими, в известной мере, физический смысл реологическими характеристиками на производстве и в лабораториях приняты в настоящее время подвижность и жесткость бетонной смеси, косвенно отражающие ее вязкостные свойства. Если показатели этих свойств

поддерживать в заданном пределе допустимых отклонений, технологический процесс изготовления изделий (конструкций) окажется нормальным и бездефектным.

Подвижность отражает способность бетонной смеси, которой была предварительно придана некоторая условная форма, например правильного усеченного конуса, деформироваться под влиянием собственной тяжести, расплываясь или ссаживаясь и приобретая иную форму или сохраняя ее при других размерах. Подвижность бетонной смеси измеряют с помощью стандартного металлического конуса (рис. 9.11), который заполняют испытуемой смесью с послойным уплотнением. При осторожном подъеме металлической формы бетонный конус осаживается под собственной тяжестью. Если величина осадки конуса находится в пределах 2—4 см, то смеси относят к малоподвижным, 4—12 см — к подвижным и более 12 см — к текучим (литым). При осадке конуса, равной нулю, смесь — жесткая, и тогда ее удобоукладываемость оценивается с помощью специального прибора для определения условного показателя жесткости.

Жесткость бетонной смеси характеризуют продолжительностью (с) вибрирования на стандартной виброплощадке (частота колебаний 3000 колебаний в минуту, амплитуда колебаний -0,5 мм), необходимого для выравнивания и уплотнения предварительно отформованного конуса бетонной смеси в приборе для определения жесткости (рис. 9.12). Цилиндрическое кольцо прибора, внутренний диаметр которого 240 мм, устанавливают и жестко закрепляют на лабораторной виброплощадке. В кольцо вставляют и жестко закрепляют стандартный конус высотой 200 мм, который заполняют бетонной смесью в установленном по стандарту порядке и после этого снимают. Диск прибора с помощью штатива опускают на поверхность отформованного конуса бетонной смеси. Затем одновременно включают виброплощадку и секундомер и наблюдают за выравниванием и уплотнением бетонной смеси в цилиндре. Секундомер останавливают, как только начнется выделение цементного теста из двух отверстий диска. Продолжительность виброуплотнения является характеристикой жесткости бетонной смеси. В целях большей точности измерения жесткости из одной пробы бетонной смеси вычисляют среднее двух определений.

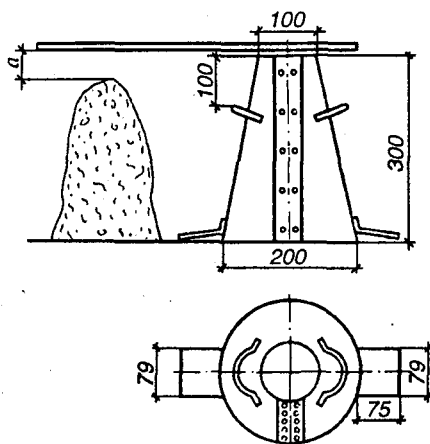


Рис. 9.11. Прибор для определения подвижности бетонной смеси (стандартный конус): *a* — осадка конуса, см

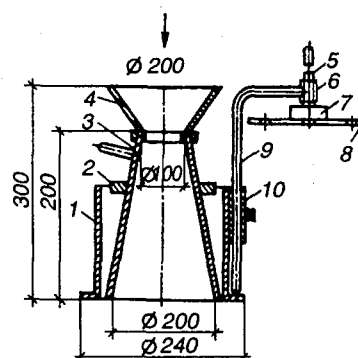


Рис. 9.12. Прибор для определения жесткости бетонной смеси:

1 — форма; 2 — упоры для крепления конуса; 3 — конус; 4 — воронка; 5 — штанга; 6 — втулка; 7 — втулка для крепления диска; 8 — диск с шестью отверстиями; 9 — штатив; 10 — зажим штатива

К особо жестким относят смеси при времени вибрации 13 с и более, к жестким — 5—12 с, к малоподвижным — менее 5 с.

Показатели подвижности и жесткости назначают с учетом густоты расположения арматуры, характера изделия, средств уплотнения и др. Так, например, при изготовлении тонкостенных густоармированных конструкций осадку конуса принимают 4 — 6 см, а при транспортировании смеси по трубам с помощью насосных установок показатель подвижности увеличивают до 8 — 10 см.

Регулирование указанных реологических характеристик бетонной смеси достигается правильным проектированием состава, а при необходимости — введением в смесь пластифицирующих и других химических добавок. Их количество строго обосновывается, поскольку оно влияет на проектный состав бетона.

Производственные операции при приготовлении бетона. Приготовленная бетонная смесь в форме распределяется механическим укладчиком или, что реже, вручную. В зависимости от разновидности изделий применяют бетоноукладчики различных конструкций — с бункерами и питателями, с копиропитателями, с челюстными затворами и т. п. Бетонную смесь, уложенную в форму, подвергают уплотнению. Наиболее типичным способом уплотнения является вибрирование. Частые колебания, создаваемые вибратором (рис. 9.13), передаются бетонной смеси и всем ее частицам, вызывая их колебательные движения. В результате снижаются силы вязкостного трения и сцепления, т. е. преодолевается реологическое сопротивление при размещении смеси и сближении частиц. Наибольший эффект уплотнения бетонной смеси вибрированием достигается при резонансных режимах, когда частоты вынужденных колебаний частиц совпадают с частотами собственных колебаний вибратора. Эффективность виброуплотнения в значительной мере зависит от двух основных параметров — интенсивности вибрирования и продолжительности.

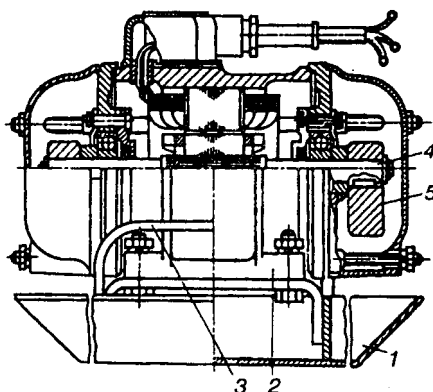


Рис. 9.13. Вибратор для уплотнения бетонной смеси:

1 — площадка; 2 — электродвигатель; 3 — ручки для перемещения вибратора; 4 — вал; 5 — дебаланс

Интенсивность вибрирования характеризуется величиной амплитуды колебаний, равной половине наибольшего перемещения частицы, и частотой вынужденных колебаний, т. е. числом периодов колебаний в секунду. Об интенсивности виброуплотнения судят по амплитудному значению ускорения, сообщаемого колеблющимся частицам, при некоторой угловой скорости

$$\omega = ar^2 = a4\pi^2 f^2, \quad (9.11)$$

где ω — ускорение, сообщаемое частицам, $\text{см}/\text{с}^2$; a — амплитуда колебаний, мм; f — частота колебаний, Гц; r — угловая скорость (рад/с). Интенсивность виброуплотнения (по Шмигальскому В.Н.) характеризуется произведением скорости колебаний на ускорение и может быть вычислена по формуле

$$U = v\omega = 8\pi^3 a^2 f^3, \quad (9.12)$$

где U — интенсивность виброуплотнения, $\text{см}^2/\text{с}^3$; v — скорость колебаний ($v = a\omega = a2\pi f$); ω — ускорение.

Интенсивность виброуплотнения выражают обычно в единицах ускорения силы тяжести. Эта характеристика интенсивности показывает, во сколько раз ускорение, полученное частицами бетонной смеси при вибрировании, больше ускорения силы тяжести.

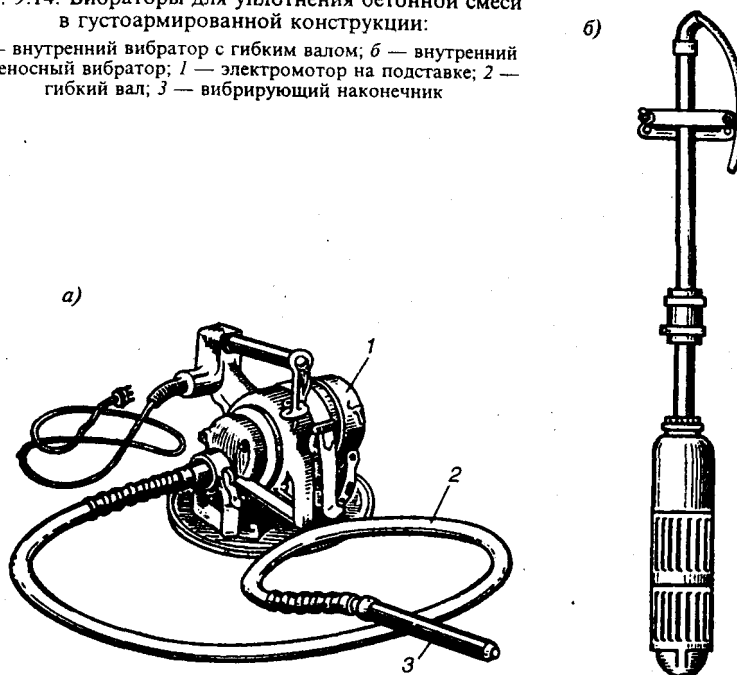
Продолжительность виброуплотнения неразрывно связана с параметрами вынужденных колебаний. При заданных параметрах для каждой бетонной смеси существует своя,

оптимальная продолжительность вибрирования. Более продолжительное вибрирование приводит к расслоению бетонной смеси и ухудшению качественных показателей бетона. Обычно амплитуда колебаний находится в пределах 0,3—0,7 мм при частоте колебаний около 3000 в 1 мин. В последние годы получают распространение низкочастотные резонансные виброплощадки с амплитудой 0,7 мм и частотой 25—40 Гц, которые более экономны в расходе энергии и менее шумные в работе. При вибрировании бетонной смеси в густоармированных конструкциях целесообразно использовать высокочастотный вибратор с частотой до 7 колебаний в 1 мин с гибким валом и цилиндрической рабочей частью (рис. 9.14).

Эффект уплотнения и качество изделий контролируют периодической проверкой величины коэффициента уплотнения, равного отношению фактической средней плотности свежесуложенного бетона к ее номинальной величине, получаемой при расчете проектного состава. Если коэффициент уплотнения находится в пределах 0,98—1,0, можно полагать, что достигнута вполне достаточная степень уплотнения изделия. Уменьшение плотности бетона на 1% приводит к снижению прочности его примерно на 5%. Понятно, что с уменьшением подвижности бетонной смеси требуется увеличивать интенсивность и продолжительность виброуплотнения. При поверхностном вибрировании слой бетонной смеси не должен быть толще 20—25 см. Для повышения эффекта уплотнения бетонной смеси малой подвижности принимают меры по увеличению удельной нагрузки на поверхность вибрируемого массива, т. е. осуществляют вибрирование с пригрузом, например, в размере от 10 до 40 или 50 г на 1 см² (или 0,1—0,5 МПа) поверхности. Возможно вибрирование, совмещаемое с прессованием под давлением 0,5—1,5 МПа, что называется вибропрессованием. При уплотнении отдельных изделий вибраторы специальной формы и размеров (виброиглы, вибробулавы и т. п.) погружают в тело бетонного массива. Распространенные способы уплотнения — виброштампование и особенно вибропрокат: Последний выполняют на специальных вибропрокатных станах. При уплотнении подвижных бетонных смесей применяют вибрационное воздействие в сочетании с вакуумированием и удалением некоторой доли воды из уплотняемой массы, двойное вибрирование, а также некоторые другие способы уплотнения, например безвибрационное уплотнение при изготовлении полых изделий — труб, колонн, столбов (опор) и др. Для их уплотнения бетонную смесь помещают в соответствующие формы, которые подвергают вращению, и смесь уплотняется за счет воздействия центробежных сил, развивающихся при частоте вращения до 900—1000 об/мин. К безвибрационным способам относятся также наливной (с добавлением в смесь суперпластификатора) и набивной (торкретирование, с выбросом смеси из сопл бетононасоса).

Рис. 9.14. Вибраторы для уплотнения бетонной смеси в густоармированной конструкции:

a — внутренний вибратор с гибким валом; *б* — внутренний переносный вибратор; 1 — электродвигатель на подставке; 2 — гибкий вал; 3 — вибрирующий наконечник



При укладке в конструкцию в зимнее время бетонную смесь предохраняют от замерзания как в процессе уплотнения, так и в первоначальный период отвердевания отформованного монолита. Важно до замерзания получить определенную прочность бетона, что устанавливается в зависимости от конкретных условий, но обычно не менее 30—50% его проектной (марочной) прочности. С этой целью используют противоморозные добавки, подогрев исходных материалов и другие мероприятия.

В зимнее время сохранить внутреннюю теплоту в бетоне, выделяющуюся в результате экзотермических реакций при его твердении, можно, покрыв его слоем теплоизоляции (шлака, древесных опилок, соломы и др.). Этот способ дает особенно эффективный результат при относительно малых поверхностях охлаждения конструкций, например массивных, при отношении поверхности S к объему V не более 6. Сохранение внутренней теплоты получило название «способа термоса». Внутренний запас теплоты увеличивают также путем предварительного подогрева воды до 80°C , заполнителей — до 40°C с тем, однако, чтобы температура бетонной смеси к моменту укладки не была выше $40—50^{\circ}\text{C}$. Нередко бетонную смесь подогревают в электродно-пластинчатом бункере. Изделия, например фундаменты, приобретают 50% марочной прочности при морозе до -40°C . При бетонировании в зимних условиях конструкций и элементов с большой поверхностью охлаждения (при отношении S/V значительно большем 6) можно укладывать бетон без подогрева, т. е. использовать холодный бетон. Для этого в бетонную смесь вводят противоморозные добавки (нитрат натрия, поташ и др.), которые снижают температуру замерзания воды в бетоне, а некоторые добавки выполняют еще и функцию катализатора твердения вяжущего вещества. Холодный бетон обычно укладывают при температурах окружающей среды не ниже -20°C с последующей теплоизоляцией, устройством ветрозащитных ограждений, утеплением опалубки, обогревом нагревательными проводами и др. Эти провода закрепляют на арматурном каркасе; длину и количество проводов определяют расчетом с учетом нагрева до 40°C . В качестве проводов используют оцинкованную стальную сетку с поливиниловой изоляцией диаметром 1,2 мм. В летнее время поверхность свежесложенного бетона защищают от непосредственного воздействия солнечных лучей и ветра пленкообразующими материалами, влажными опилками, матами и т. п. В сухую погоду открытые поверхности бетона увлажняют водой. Используют также полиэтиленовые и поливинилхлоридные пленки, розлив по поверхности защищаемого бетона битумной эмульсии и др.

При укладке в конструкцию бетонной смеси в очень жаркую и сухую погоду ее предохраняют от повышения температуры и быстрого высыхания после укладки.

От нагревания солнечными лучами предохраняют и компоненты: периодически увлажняют заполнители холодной водой или применяют охлаждающие устройства для понижения их температуры; укрывают водопроводные линии, окрашивают баки с водой в белый цвет и т. п.

Воду затворения нередко искусственно охлаждают или частично заменяют льдом, с тем чтобы он успел растаять к моменту выгрузки смеси.

Все изложенные выше меры особенно полезны при строительстве массивных сооружений с использованием больших объемов бетонной смеси.

В наиболее жаркое время дня в условиях сухого и жаркого климата целесообразно в исключительных случаях сделать перерыв в производстве бетонных работ на строительном объекте.

Отформованные и уплотненные изделия или конструкции из бетона подвергают тепловой, тепловлажностной, автоклавной или другой обработке, чем достигается существенное ускорение процессов твердения. Прочность при нормальных условиях твердения нарастает сравнительно медленно, поэтому приходится длительное время ожидать получения необходимой прочности изделий, например 60—70% от марочной, определяемой в 28-суточном сроке хранения. Самым распространенным способом ускорения структурообразования и упрочнения служит тепловая обработка в пропарочных камерах периодического или непрерывного действия или в формах с термоподдонами. Применяют также бетонирование с электроразогревом смеси. Для этого бетонную смесь в течение 10—15 мин разогревают до температуры 50—90°C с помощью электронагревательных устройств, укладывают в стальную опалубку, уплотняют и укрывают от охлаждения, что позволяет поднять суточную прочность бетона до 60—65% марочной. Ускорить твердение бетона можно также химическими методами: путем введения в бетонную смесь небольших количеств хлористого натрия, хлористого кальция, растворимого стекла или комплексных веществ — нитрит-нитрата натрия, нитрита натрия, солей более сложного состава и др. На практике используют одновременно несколько способов ускорения твердения, что приводит обычно к получению значительного технико-экономического эффекта, позволяет производить бетонирование в зимнее время при температурах -10, -15°C и ниже. При введении химических добавок удается снижать водосодержание, поскольку некоторые добавки оказывают пластифицирующее воздействие на бетонную смесь.

За последние годы разработан способ — эргобетонирование¹, который заключается в том, что бетонную смесь в процессе ее перемешивания подвергают интенсивному одновременному и согласованному обрабатыванию механической (вибрационной), тепловой и электрической энергиями, одновременному барботированию в условиях магнитной пароионной среды. Последующее постепенное остывание отформованного материала благоприятствует более полному протеканию процессов структурообразования с минимумом технологической пористости. Наилучший способ такой комбинированной синэнергообработки воспроизводится с помощью специального оборудования — синэнергогенератора.

Разработаны высокоэффективные пластификаторы и суперпластификаторы, с введением которых можно уменьшать на 20—30% и более содержание воды в бетонной смеси, т. е. уменьшать В/Ц, а следовательно, увеличивать прочность бетона, например в суточном возрасте на 50% и более, в месячном — на 30—40%. Если количество воды в бетонной смеси не уменьшать, то при добавлении суперпластификатора эта смесь становится литой, легкоподвижной, удобной при изготовлении тонкостенных конструкций или фасонных

¹ Арбенев А.С. От: электротермоса к синэргобетонированию. Владимир, ВГТУ, 1996.
Синэргобетонирование изделий и конструкций: Сб. тезисов. Владимир, ВГТУ, 1998.

деталей с тесно расположенной арматурой. Литые бетонные смеси удобны также при подаче их бетононасосом, при создании плотной поверхности изделий.

Добавление суперпластификатора несколько удорожает бетон, но увеличивает производительность труда при изготовлении изделий, уменьшает продолжительность тепловлажностной обработки бетона.

В качестве суперпластификаторов используют либо сульфинированные меламиноформальдегидные смолы, либо низкомолекулярные полимеры продукты взаимодействия нафталинсульфо-кислоты и формальдегида. Такого рода добавки способствуют диспергированию гидратированного цемента, обволакиванию дисперсных частиц экранирующими пленками органического вещества с эффектом пластификации смеси без нарушения основных процессов отвердевания и формирования структуры цементного камня и бетона.

При применении пластифицирующих добавок проверяют, особенно при использовании новых добавок, чтобы они не были воспламеняющимися, ядовитыми, не вызывали коррозии металлической арматуры в бетоне.

Для повышения интенсивности твердения бетона кроме тепло-влажностной обработки иногда активируют воду затворения. Так, по данным И.М. Грушко, добавление в воду щелочи, например едкого натра, и части отдозированного цемента с последующей обработкой ультразвуком и электромагнитным полем способствует образованию микрокристаллических частиц как «затравок» в твердеющем цементном тесте.

В производственных условиях осуществляют постоянный технологический контроль за качеством исходных материалов, поступающих на завод, их подготовкой к употреблению в составе компонентов смеси, за качеством бетонной смеси (подвижностью, жесткостью, фактическим составом бетонной смеси, однородностью перемешивания и т. п.), за качеством отвердевшего бетона, особенно за его прочностью и ее нарастанием во времени.

При оценке прочности бетона пользуются как разрушающими методами (испытанием образцов с их разрушением), так и адест-руктивными—ультразвуковым импульсным методом, методом упругого отскока, радиометрическим методом, рентгеновскими лучами в специальных установках и др. Эти методы позволяют также обнаруживать трещины и другие дефекты в бетонных изделиях и конструкциях.

Структура и свойства тяжелого бетона. Тяжелый бетон — типичный представитель искусственных строительных конгломератов. В нем отвердевшее цементное тесто, или цементный камень, полностью окружает каждую частицу мелкого и крупного заполнителя и, кроме того, заполняет пространство между этими частицами, составляя, таким образом, непрерывную пространственную сетку, или матрицу. В процессе отвердевания цементного теста частицы заполнителя оказались сцементированными в общий монолит. В монолите 20—30% его объема занимает цементный камень, а на долю заполнителя приходится, следовательно, 70—80% объема. В пределах объема тяжелого бетона имеется также капиллярно-поровая часть, которая образуется в результате испарения свободной воды, недоуплотнения смеси и усадочных явлений. Поры имеются также в частицах заполнителя, а микропоры характерны для цементного камня. Нередко воздушные поры (1—2%) равномерно распределены в объеме бетона, возникая в процессе перемешивания бетонной смеси со специальной воздухововлекающей добавкой, что обычно повышает морозостойкость бетона. Поры цементного камня можно разделить условно на особо тонкие, например, диаметром до 1000 А, называемые гелевыми, и более грубые диаметром, например, от 1000 А до 10 мкм, называемые капиллярными, поскольку многие из них взаимосвязаны, образуя своеобразную систему «микроканалов», доступных к проникновению и движению по ним внешней водной среды, понижающей морозостойкость бетона.

Непременной структурной частью бетона, подобно другим конгломератам, являются контактные зоны (обычно шириной до 50—65 мкм), микроструктура цементного камня в

которых несколько отлична от такой же структуры в объемном цементном камне повышенной концентрацией кристаллической фазы и пониженным содержанием микропор. Контактный слой может также отличаться химическим составом его кристаллической фазы. Такова в общих чертах структура и микроструктура тяжелого цементного бетона.

В значительной мере структура по свойствам неоднородна, как неоднородны составляющие ее компоненты (щебень, песок, цементный камень). Она не свободна от многих дефектов, связанных с технологическим и эксплуатационным периодами, что отражается на уровне показателей механических свойств и долговечности бетона.

Для тяжелых бетонов характерным является не только высокое значение средней плотности, но и высокая прочность. Значения средней плотности находятся в пределах 1800—2500 кг/м³, а прочность по сжатию — от 5 до 80 МПа. Проектные марки его по пределу прочности при сжатии: М50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500, 600, 700 и 800.

Класс бетона по пределу прочности при сжатии (в МПа) определяют с помощью образцов размером 15х15х15 см (с умножением на коэффициент 0,778), изготовленных из бетонной смеси и испытанных через 28 суток твердения при хранении в нормальных условиях, т. е. при температуре 20±2°С, относительной влажности воздуха не ниже 90%. Имеются некоторые исключения, например гидротехнический бетон речных сооружений оценивают по прочности также в 60-, 90- и 180-дневном возрасте образцов нормального твердения. При других размерах образцов-кубов с ребром 7, 10, 20 и 30 см результаты испытаний умножают на масштабные коэффициенты, соответственно равные 0,85; 0,91; 1,05; 1,10. Для оценки прочности вместо образцов-кубов нередко используют призмы размером 10х10х40 см или других размеров, испытываемых на изгиб, а также образцы-цилиндры диаметром 7, 10, 15, 20, 30 см и высотой, равной диаметру или двум диаметрам. Бетон называют высокопрочным, если его марка выше 600, например 700 или 800. Иногда к высокопрочному относят бетон с прочностью выше стандартной марки цемента, использованного в его составе. В настоящее время активность вяжущих — цементов (и гипсов), применяемых в бетонах, значительно увеличена, что позволяет получать бетоны с пределом прочности при сжатии 100 МПа. По мнению некоторых специалистов, возможности в этом направлении не исчерпаны и прочность бетона на сжатие может достигнуть 400 МПа.

Прочность бетона на растяжение составляет от 6 до 10%, а при изгибе — от 10 до 16% от предела прочности при сжатии. По пределу прочности на осевое растяжение бетоны делятся на марки от 10 до 40, а при изгибе — от 1,5 до 5,5 МПа. Упрочнить бетон на растяжение можно армированием, поскольку металлическая арматура способна почти полностью принять на себя растягивающие напряжения, разгружая от них бетон. Арматура может располагаться как направленно, так и в хаотическом виде (при волокнах-фибре).

Прочность бетона не остается величиной постоянной, при благоприятных условиях — высокой влажности воздуха, положительной температуре и т. п. — отмечается прирост прочности, определяемый по формуле

$$R_{\tau} = R_{28} \frac{\lg \tau}{\lg 28}, \quad (9.13)$$

где τ — возраст бетона в сутках, но не менее трех суток.

К возрасту одного года тяжелый бетон в этих условиях самоупрочняется на 70—90% от R_{28} .

Кроме статической прочности, иногда проверяют величину динамической прочности, или ударной вязкости. При вибрационных воздействиях на конструкцию важно определять усталостную прочность бетона, характеризуемую количеством циклов вибрационного воздействия до признаков разрушения структуры.

Долговечность бетонных конструкций в большой мере обуславливают деформативные свойства бетона. Особо следует выделить ползучесть, которая проявляется при сжимающих, растягивающих и других напряжениях, действующих в течение длительного времени. Ползучесть в бетонах в значительной мере обусловлена ползучестью цементного камня и, в соответствии с законом конгруэнции ИСК, возрастает с увеличением в нем теплоты по мере роста водо-цементного отношения. Но ползучесть зависит также от качества заполнителя. Она больше при уменьшении модуля упругости горной породы, применяемой для получения заполнителя. Кроме того, ползучесть связана с наличием микротрещин в контактной зоне на границе цементного камня с заполнителем и зависит еще от ряда других причин. Цементный бетон обладает упругими свойствами. При оптимальных структурах упругие деформации бетона тем значительнее, чем более упругим является цементный камень. Кроме того, упругие свойства зависят от уровня нагружения бетона механическими силами. При оценке упругости обычно принимают некоторое постоянное напряжение, передаваемое на бетон, например, равное по величине 0,2 от предела прочности при сжатии.

При твердении бетона возникают линейные и объемные деформации под влиянием усадки и набухания, что приводит к появлению трещин, поэтому стремятся уменьшить размеры этих деформаций. В возрасте 1—1,5 года конечный размер усадки бетона составляет от 0,1 до 1,5 мм/м, что зависит от разновидности принятого цемента, количества цементного камня в бетоне, внешних температур-но-влажностных условий. Вызывают деформации и температурные колебания воздуха или другой внешней среды. Коэффициент теплового расширения бетона находится в пределах от $7 \cdot 10^{-6}$ до $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, что зависит от разновидности крупного заполнителя; в среднем он принимается равным $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Определенную пользу в «залечивании» возникающих при твердении дефектов и усадочных деформаций может приносить, как показали исследования А.В. Саталкина, статические и даже комплексные (статические с динамическими и вибрационными) нагрузки на молодой бетон. При определенных условиях раннее нагружение твердеющего бетона приносит закономерное упрочнение, что происходит вследствие некоторой благоприятной перестройки микро- и макроструктуры при твердении под нагрузкой. Важно только, чтобы напряжения не превышали предела длительной прочности бетона на ранней стадии его твердения.

На снижение величины усадки бетона оказывает влияние повышение плотности заполнителя, его гранулометрический состав, снижение водоцементного отношения, оптимизация структуры бетона. Применение напрягающих и расширяющихся цементов также благоприятствует получению бетонов с компенсированной усадкой, повышенной морозостойкостью и водонепроницаемостью. За рубежом используют расширяющиеся синтезированные добавки, вносимые в смесь. НИИЖБом предложена отечественная добавка того же назначения. Конструкции из бетона с компенсированной усадкой превосходят по качеству традиционные.

Важнейшей характеристикой качества бетона является морозостойкость. По этому свойству бетоны маркируют: F50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500. К невыдержавшим установленного маркой числа циклов замораживания при температуре -15 — 20°C и оттаивания при температуре $+15$ — $+20^\circ\text{C}$ (по стандарту) относятся бетонные образцы, которые теряют более 5% по массе за время испытаний (эта оценка только для дорожных бетонов), а в прочности на сжатие — более 15% от ее первоначального значения. По стандарту для сравнения принимается прочность образцов в так называемом эквивалентном возрасте, определяемом с учетом продолжительности твердения.

Бетон разделяют на марки и по водонепроницаемости, что имеет особое значение, когда в эксплуатационных условиях бетон подвержен длительному контактированию с водной средой. Проверка полной водонепроницаемости (или иногда водопроницаемости) производится в лаборатории путем воздействия напора воды на образец цилиндрической формы и толщиной 15 см при различных гидростатических давлениях, выражаемых в Па (от $2 \cdot 10^5$

до $12 \cdot 10^5$). Приняты следующие марки: W2, W4, W6, W8, W10 и W12, которые особенно важно учитывать при проверке качества бетона для труб, гидротехнического и других видов тяжелого бетона.

Непроницаемый бетон может оказаться проницаемым при более высоких давлениях воды или при жидкостях, которые более подвижны, с меньшей вязкостью, например легких нефтепродуктах. В таких случаях повышают непроницаемость бетона введением уплотняющих (например, алюмината натрия) и гидрофобизирующих добавок, употреблением защитных синтетических пленок. Фильтрация нефтепродуктов снижается при добавлении в бетонную смесь хлорного железа или других проверенных добавок. Для всех жидких сред, особенно воды, фильтрация (проницаемость их) затруднена при использовании в бетоне расширяющегося и напрягающего портландцементов.

Значение прочности в технологии бетона существенно возрастает, если в заданном пределе она остается постоянной при изготовлении массовой продукции. Если же она меняется от замеса к замесу, то получаемая продукция вследствие неоднородности по прочности является низкой по своему качеству и дорогой по стоимости. Однородность бетона заданной марки оценивают по результатам контрольных испытаний бетонных образцов за более или менее длительный период времени. С этой целью определяют коэффициент вариации по формуле $V = S/R_{cp}$, где S —среднее квадратичное отклонение частных результатов испытания от средней прочности (R_{cp}):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (R_i - R_{cp})^2}{n - 1}}. \quad (9.14)$$

Средняя прочность бетонных образцов равна

$$R_{cp} = \sum R_i / n, \quad (9.15)$$

где R_i — предел прочности отдельного образца; n — число испытанных образцов бетона данной марки.

Однородность бетона признается удовлетворительной, если коэффициент вариации V имеет значение не более 0,135 (или 13,5%). Правильно организованное производство бетона позволяет достигать значения V не выше 7—8% или даже ниже. Снижению V способствуют автоматизация и полная механизация производственных процессов, высокий уровень подготовки исходных материалов, оптимизация состава бетона и технологических операций на заводе.

При всех достоинствах тяжелого бетона он имеет два больших недостатка — большую среднюю плотность и значительную теплопроводность. Поэтому, когда не требуется высокой прочности, переходят к применению легких, менее прочных, но более «теплых» бетонов.

9.4.3. ЛЕГКИЕ БЕТОНЫ

Легкие бетоны с применением в них пористых заполнителей находят в строительстве все большее применение. Конструкции из легких бетонов позволяют улучшить теплотехнические и акустические свойства зданий, значительно снизить их массу, успешно решить проблему объемного и многоэтажного строительства, а также строительства в сейсмических районах страны. Применение легких бетонов позволяет уменьшить стоимость строительства на 10—20%, снизить трудовые затраты на стройках до 50%, увеличить производительность труда на 20%. Развитие производства бетонов с применением пористых заполнителей характерно как для нашей страны, так и зарубежного строительства. В нашей стране наиболее широко используемым заполнителем являются керамзит, а также аглопорит, перлит и др. Керамзитовый гравий составляет до 80% общего объема современного производства искусственных пористых заполнителей. За рубежом более типичным легким заполнителем является термозит (шлаковая пемза).

Бетоны называются легкими, если в сухом состоянии их средняя плотность не выше 2000 кг/м^3 . Снижения их массы достигают в основном за счет облегчения заполнителя, иногда путем поризации "вяжущей части".

По пределу прочности при сжатии конструкционные легкие бетоны разделяют на классы В2; В2,5; В3,5; ...; В40 или на марки (МПа): М20; М35 и т. д. до М500. Теплоизоляционные легкие бетоны разделяют на классы В0,35; В0,75; В1. По средней плотности в сухом состоянии существуют следующие марки легких бетонов: D200; D300; D400; ...; D2000. При испытаниях на морозостойкость легкие бетоны выдерживают от 25 до 500 циклов попеременного замораживания и оттаивания. По водонепроницаемости конструкционные легкие бетоны имеют те же марки, что и тяжелые бетоны.

В зависимости от назначения и технических свойств легкие бетоны разделяют на конструкционные, применяемые для изготовления несущих конструкций (стены, перекрытия и др.); теплоизоляционные, используемые в ограждающих слоистых конструкциях как утеплитель и для теплоизоляции, звукопоглощения; конструкционно-теплоизоляционные с прочностью 2,5—10 МПа — для ограждений.

Конструкционные легкие бетоны марок 150—400 получают на основе портландцемента марок 300—600 с применением керамзитового гравия (керамзитобетоны), аглопоритового щебня (аглопори-тобетоны) или шлаковой пемзы (шлакобетоны). В качестве мелкого заполнителя применяют природный песок, но может быть использован и дробленый песок. Средняя плотность этих бетонов с применением кварцевого песка составляет $1600\text{—}1800 \text{ кг/м}^3$, что значительно меньше, чем при применении плотного заполнителя для получения тяжелого бетона той же прочности. Эффективность легких бетонов в данном случае особенно наглядна при сравнении их по коэффициентам конструктивного качества. Этот коэффициент, обозначенный ККК, равен отношению предела прочности бетона при сжатии к его средней плотности. При равной прочности у легкого конструктивного бетона в среднем он выше в $2400/1700 = 1,4$ раза, поэтому легкие бетоны целесообразнее применять, чем тяжелые одинаковой прочности, в междуэтажных перекрытиях отапливаемых зданий, в проезжей части мостов, в железобетонных конструкциях с обычной и предварительно напряженной арматурой (балки, прогоны, лестничные марши и площадки и т. п.). Широкому применению конструктивных легких бетонов в наружных конструкциях способствует высокая морозостойкость (Мрз35 и выше), а при использовании для гидротехнических сооружений их морозостойкость увеличивают до 300 и выше, что достигается введением некоторых добавочных веществ (ПАВ). Теплопроводность этих бетонов в сухом состоянии равна 0,35—0,60, а в стене 0,6—0,8 Вт/(м·К), тогда как у тяжелых она равна 1,25—1,55 Вт/(м·К).

Теплоизоляционные легкие бетоны имеют невысокую среднюю плотность — ниже 500 кг/м^3 и обладают также хорошими теплозащитными свойствами, так как в сухом

состоянии их теплопроводность находится ниже 0,20 Вт/(м·К). Положительные свойства теплоизоляционных легких бетонов позволяют использовать их в конструкциях как достаточно надежную теплоизоляцию.

Бетоны средних марок (по прочности) обладают средней плотностью в пределах 500—1400 кг/м³ и теплопроводностью до 0,5—0,6 Вт/(м·К) и поэтому с большим успехом совмещают функции конструктивного и теплоизоляционного материала (конструкционно-теплоизоляционного бетона). Величину средней плотности и прочность легкого бетона регулируют в основном подбором соответствующего заполнителя — природного или искусственного. Так как цементный камень значительно утяжеляет бетон, то его содержание стремятся довести до минимума, а макроструктуру приблизить к контактной при данной технологии его формирования. В связи с этим для легких бетонов используют пористый заполнитель, особенно тот, который сохраняет прочность на достаточном уровне. В общей формуле (9.3) прочности бетона значение показателя степени n быстро увеличивается с понижением прочности заполнителя, уменьшением его средней плотности. Наиболее часто в легких бетонах применяют заполнители в виде щебня, гравия и песка из природных материалов — пемзы, вулканического туфа, ракушечника, известкового туфа и др. и из искусственных — шлаковой пемзы (термозита), керамзита, аглопорита, вакулита, шунгизита (вспученные при нагревании шунгитовые сланцы), вспученных перлитов и вермикулитов и др. По средней плотности они находятся в широком диапазоне марок — от 100 до 1200 и более. Прочность этих зернистых заполнителей обычно оценивают по величине напряжения при раздавливании их в металлических цилиндрах, и она колеблется от 0,4 до 20 МПа.

В легком бетоне может быть использован не только минеральный, но и органический заполнитель — древесная дробленка, оду-бина, костра, гранулированный пенополистирол и т. п. Размер зерен заполнителя равен 1,25—40 мм. Получаемую разновидность легкого бетона (арболит) используют как стеновой материал в жилищном строительстве.

Вязущим веществом в легких бетонах служат обычный или быстротвердеющий портландцемент, а в отдельных случаях шлакопортландцементы. Арболит иногда изготавливают и на основе высокопрочного гипса, но чаще — портландцемента.

Подбор состава, приготовление, укладка и уплотнение бетонной смеси, уход за бетоном, например в покрытиях, не отличается от тех же операций, принятых в технологии тяжелых бетонов.

Общий метод проектирования состава ИСК в полной мере распространяется также на легкие бетоны, хотя по аналогии с тяжелыми имеются другие, специфические методы подбора состава легкого бетона, основанные на детально изученных частных закономерностях. Одна из таких частных закономерностей весьма близка к общему закону створа. Она была детально изучена проф. Н.А. Поповым и представлена в теории легких бетонов. Было отмечено, что при данном составе легкого бетона его прочность связана с количеством воды, добавляемой к смеси. По мере прибавления воды прочность бетона увеличивается и максимум прочности достигается при оптимальной добавке воды. Пройдя через максимум, при дальнейшем увеличении содержания воды прочность бетона снижается под влиянием снижения его плотности. Установлено, что наибольшая прочность и оптимальная подвижность получаются при добавлении воды в количестве, при котором коэффициент выхода уплотненной смеси становится наименьшим. Показано, что на эту зависимость влияют технологические факторы. Характер расположения экстремумов свойств легкого бетона (прочности, подвижности, коэффициента выхода) на одной вертикальной линии остается неизменным (рис. 9.15), отражая общий закон створа, открытый значительно позже этой важной частной зависимости.

Как отмечалось выше, наибольшее применение у нас в стране получили легкие бетоны с керамзитом, т. е. керамзитобетон, реже — аглопоритобетон, шунгизитобетон и др. Нередко в бетон еще более легкие заполнители; например перлит в виде песка. Известное распространение получил поризованный керамзитобетон с вспученным

перлитовым песком. Последний вносят в ограниченном количестве (до $0,2 \text{ м}^3$ на 1 м^3 бетона), что обеспечивает получение необходимой плотности бетона. Новой разновидностью служит и азе-ритобетон (азерий—новая разновидность вспученного заполнителя).

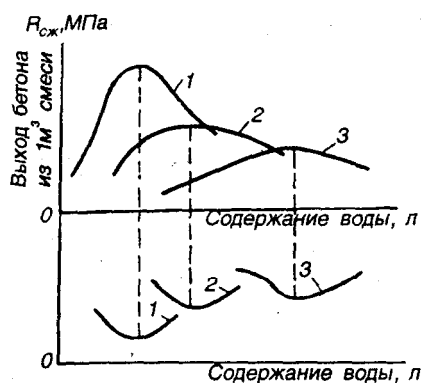


Рис. 9.15. Общий характер влияния количества воды на прочность и выход легких бетонов при уплотнении (по Н.А. Попову):

1 — сильно; 2 — среднем; 3 — слабо

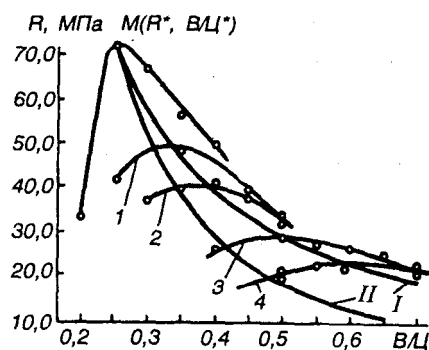


Рис. 9.16. График зависимости предела прочности при сжатии керамзитобетона оптимальной структуры от изменения количества и прочности керамзита:

I — при прочности керамзита 6 МПа; II — при прочности керамзита 1,7 МПа; 1, 2, 3, 4 — отношения объемов «керамзит:песок» соответственно равные 0,6; 1,9; 3,1; 4,3

Независимо от разновидности заполняющей части на легкие бетоны полностью распространяются общие закономерности оптимальных структур (рис. 9.16). Среди разновидностей легких бетонов следует выделить крупнопористый и поризованный бетоны.

Крупнопористый, или беспесчаный бетон, относится к экономичным и эффективным. Для его производства требуются сравнительно небольшие капиталовложения, небольшой расход цемента и в основном местные заполнители. Этот легкий бетон малотеплопроводен, что снижает расход топлива на отопление помещений в зданиях. Он не содержит песка, что обуславливает его крупнопористое строение.

В качестве заполнителя в крупнопористых бетонах используют щебень или гравий размером от 5 до 40 мм, которые могут быть плотными и пористыми, например керамзит, кирпичный бой и др. Как отмечено, в этом бетоне ограниченное содержание портландцемента ($120—150 \text{ кг/м}^3$), что приводит к получению бетона сравнительно невысоких марок — 15, 25, 35, 50, 75 и 100. При введении пластифицирующих добавок можно еще больше снизить расход цемента, до $80—100 \text{ кг/м}^3$.

Крупнопористый бетон используют как стеновой материал в зданиях высотой до четырех этажей, которые оштукатуривают, чтобы избежать продуваемости ограждающих конструкций.

Поризованные бетоны отличаются тем, что содержат не только легкий заполнитель, но и специально поризованный матричный материал (цементный камень). Для этого в состав бетона вводят пори-зующие вещества с образованием пены, причем замкнутые поры заполняются воздухом. Поризованный бетон изготавливают из цемента, минерального порошка (природного, тонкомолотого гранулированного шлака, горелых пород и др.) путем смешения их с предварительно подготовленной вспененной массой из воды и пенообразователя, например смолосапонинового, получаемого из мыльного корня. Проектный состав такой массы устанавливают в лаборатории в соответствии с общим методом проектирования состава ИСК по качеству или с применением ЭВМ.

Эти разновидности легких бетонов обладают улучшенными теплотехническими свойствами и поэтому применяются как теплоизоляционный или конструктивно-теплоизоляционный материал в стеновых ограждающих конструкциях. Следует, однако,

отметить, что поризованный бетон при его изготовлении требует дополнительных трудозатрат и применяется реже.

9.4.4. ЯЧЕИСТЫЕ БЕТОНЫ

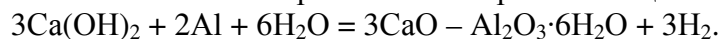
Широко используемая разновидность бетонов и растворов имеет своеобразную — ячеистую — структуру макропор, равномерно распределенных в объеме бетона и отделенных друг от друга тонкими и достаточно прочными перегородками (мембранами). Средняя плотность таких бетонов в высушенном состоянии колеблется в широких пределах: от 1200 и ниже 500 кг/м³. При средней плотности не более 500 кг/м³ их используют как теплоизоляцию, от 500 до 900 кг/м³ — в качестве конструктивно-теплоизоляционного и от 900 до 1200 кг/м³ — конструкционных материалов, обычно армированные металлической арматурой.

Другие свойства характеризуются следующими показателями: прочность — 3—15 МПа, морозостойкость — более 25 циклов, теплопроводность — 0,08—0,25 Вт/(м·К), усадка — 0,2—0,6 мм/м. Стены из ячеистых блоков являются наиболее экономически эффективными по сравнению с другими ограждающими конструкциями — железобетонными трехслойными панелями с минеральным утеплителем, панелями из керамзитобетона, кирпичными стенами и др. Эти стены — однослойные без дополнительного утеплителя, экологически чистые и достаточно комфортные для проживания, особенно после облицовки их, например, силикатным кирпичом. У ячеистых, как и у поризованных, бетонов цементный камень в результате добавления в свежеприготавливаемую массу добарки — порообразователя оказывается насыщенным порами, в основном замкнутыми, ячеистыми. В отличие от поризованных производство ячеистых бетонов сопровождается более выраженным эффектом вспучивания исходной смеси.

Вспучивание любого вяжущего вещества, как неорганического, так и органического, чаще всего достигается под влиянием вводимых в смесь добавочных реагентов. В результате взаимодействия реагирующих веществ в смеси выделяется газ, например водород или кислород. Кроме химических методов поризация со вспучиванием может проходить механическим путем за счет образования в смеси устойчивой пены. В связи с этим ячеистые бетоны разделяют на газобетоны и пенобетоны.

Вместо портландцемента в ячеистом бетоне нередко используют известь, и тогда бетон именуют газосиликатом. При применении шлаковых вяжущих веществ получают газшлакобетон, гипса — газогипс, смешанных вяжущих типа ГЦПВ, ГШЦПВ и др. — соответствующие им бетоны.

Газобетон и газосиликат. Преимущественное распространение в строительстве получили газобетоны. В качестве газообразователя используют тонкоизмельченный алюминиевый порошок (алюминиевую пудру ПАК-31). Вступая в химическую реакцию с гидроксидом кальция, он способствует выделению молекул водорода и соответствующей энергии химической связи образования из простых веществ:



Выделяемый водород частично теряется при перемешивании компонентов газобетона (вяжущего, заполнителей), но большая его часть (до 70—85%), расширяясь, вспучивает цементное тесто. Ячеистое цементное тесто затвердевает, образуя высокопористую матричную часть этого конгломератного материала. Крупный заполнитель в нем отсутствует. Чтобы процесс вспучивания протекал интенсивнее, к портландцементу добавляют некоторое количество извести-пушонки, примерно 10% его массы. Быстрая укладка смеси в металлические формы приводит к тому, что процесс газообразования происходит в основном в период нахождения смеси в этих формах и продолжается примерно 15—20 мин. Важно, чтобы к моменту завершения процесса выделения водорода бетонная смесь загустела и смогла зафиксировать ячеистую структуру матричной части бетона.

Другим газообразователем вместо алюминиевой пудры может служить пергидроль, т. е. техническая перекись водорода. В щелочной среде цементного теста или цементного

раствора пергидроль разлагается с выделением молекул кислорода и соответствующей энергии химической связи: $2\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$.

Молекулы кислорода вспучивают цементное тесто или строительный раствор в течение 7—10 мин, что позволяет получить газобетон средней плотностью до 1200 кг/м^3 . Исследования показали положительное влияние на образование макроструктуры ячеистых бетонов совместного применения пергидроля и хлорной извести. Повышению однородности распределения пористости способствует кратковременная (до 20 с) обработка компонентов ячеистобетонных смесей в электромагнитном поле, особенно в присутствии магнито-активных добавок, например пиритных огарков, ферросилиция.

Изделия из ячеистого бетона изготавливают по автоклавному и неавтоклавному способам производства. Технология может быть литьевой при высоких значениях фазового отношения ($V/T = 0,45—0,60$) или вибрационной, при которой применяют смеси с пониженным фазовым отношением ($V/T = 0,30—0,40$).

Формы могут быть горизонтальными разборными с запариванием изделий в автоклавах в вертикальном положении, вертикальными в виде кассетных установок. На большинстве заводов в нашей стране нашел распространение литьевой способ технологии с резательной и виброрезательной операцией. Для резательного способа производства характерно формование массива объемом $5—18 \text{ м}^3$ с последующим его разрезанием в двух или трех плоскостях, автоклавной обработкой изделий.

Изготавливают газобетон в такой последовательности. Вяжущее, в качестве которого обычно применяют портландцемент, отвешивается на автоматических дозаторах и поступает в смеситель непрерывного действия. Сюда же загружают кремнеземистый компонент — молотый кварцевый песок, в котором содержится не менее 80—85% кремнезема, тонкостью помола более $2000 \text{ см}^2/\text{г}$, что в 10 раз и более выше удельной поверхности немолотого песка. На некоторых заводах по производству ячеистого бетона вместо молотого песка применяют маршалит, каракумские барханные пески, золу-унос ТЭС, молотые шлаки и др. При повышенной средней плотности газобетона (свыше 1000 кг/м^3) допускается заменять часть молотого песка немолотым. Для регулирования срока схватывания цемента иногда в смеситель добавляют двуводный гипс.

Сухие компоненты перемешивают с водой в течение 2—3 мин, в процессе перемешивания вводят водную суспензию алюминиевой пудры или другого газообразователя, например пергидроль (водный 80%-ный раствор перекиси водорода). Готовую, хорошо перемешанную смесь выгружают из газобетоносмесителя в стальные формы, в которых происходит ее вспучивание при температуре $20—40^\circ\text{C}$. Формование изделий (плит, блоков и др.) может производиться на виброплощадках. Преимущественное распространение при перемешивании и формовании изделий получил способ вибрации (вибровспучивание), улучшающий ячеистую структуру газобетона и ее однородность. Вибрация позволяет снизить количество воды затворения, ускорить вспучивание и упрочнение по сравнению с безвибрационной, или литьевой, технологией, осуществляемой в неподвижных формах. Особенно эффективна вибрация при введении пластификатора или поверхностно-активных веществ, снижающих реологическое сопротивление смеси. Отечественный способ вибрационного перемешивания прогрессивнее зарубежного литьевого, так как кроме снижения V/T позволяет вспучивать сырец за 5—10 мин (вместо 1—2 ч), набирать прочность сырца за 30—60 мин (вместо 120—360 мин); прочность получаемых изделий и их морозостойкость на 20—40% выше; уменьшены остаточная влажность и, следовательно, усадка изделий (на 20—30%).

Наибольшее распространение получил способ производства газобетона в вертикальных кассетных формах. Кассета имеет ряд разделительных вертикальных металлических стенок, установленных друг от друга на расстояниях, определяемых толщиной формируемых панелей. Между каждыми двумя формовочными отсеками размещается тепловой сек. Для повышения качества и совершенствования технологии изделий из ячеистых бетонов, особенно с невысокой средней плотностью, осуществляют

герметизацию формовочного пространства. В результате повышенного давления газа создаются условия для получения более плотных межпоровых перегородок, увеличения прочности газобетона. Кроме того, исключается срезка «горбушки» и увеличивается оборачиваемость кассетных установок, что повышает эффективность производства газобетона.

На завершающей стадии технологического процесса кассетные формы поступают на предавтоклавную выдержку, затем удаляется неровная верхняя часть («горбушка») и массив разрезается на изделия заданных размеров с помощью резательной машины. Ножом в ней является натянутая металлическая струна, совершающая возвратно-поступательные и вращательные движения, что позволяет разрезать массив в вертикальном и горизонтальном направлениях. Через 30—40 мин, а при вибрационном вспучивании несколько быстрее, изделия направляют в автоклавы для тепловлажностной обработки. Если вяжущим является портландцемент, то дальнейшее твердение изделий возможно и без автоклавов. По физико-химической сущности отвердевания изделий автоклавирование относится к процессам сложным. Оно производится при постепенном подъеме, изотермической выдержке и снижении давления пара и температуры среды. Изотермический период при наивысшей температуре 175—200°C составляет примерно 6—8 ч. При этом в основном образуются гидросиликаты кальция, другие соединения, упрочняющие структуру.

После автоклавной обработки изделия транспортируют к складскому помещению, производят проверку размеров и при необходимости — фрезерование, отделку поверхности и т. п. Если вяжущим является известь с кремнеземистым компонентом, а получаемый конгломератный материал — газосиликат, то автоклавная обработка изделий строго обязательна. Она может начинаться через 20—30 мин после формования (вместо 30—40 мин при газобетоне). Следует отметить, что наибольший объем (около $\frac{2}{3}$) производства теплоизоляционных ячеистых бетонов приходится на долю газосиликата.

Расход извести в ячеистых бетонах несколько ниже, чем портландцемента (например, 150—180 вместо 270—300 кг/м³). При применении известково-цементного песчаного вяжущего общий расход его возрастает, но расход каждого компонента составляет около 125 кг/м³.

Пенобетон и пеносиликат получают с применением пенообразователей — смолосапонинового, клееканифольного, ГК, алюмосульф-фонафтенного и др. Чтобы техническая пена до затвердевания ее стенок («мембран») не распадалась, в смесь вводят стабилизаторы — вязкие вещества типа жидкого стекла, животного клея. Основным компонентом смеси, как и в газобетонах и газосиликатах, остаются цементное тесто, цементно-песчаная или известково-песчаная растворные смеси. Песок подвергают частичному или полному помолу, иногда с вяжущим. Пену изготавливают отдельно в пеновзбива-теле и затем перепускают ее в пенобетоносмесительный аппарат; туда же подают растворную смесь. Через 2—3 мин перемешивания готовая пенобетонная смесь поступает в бункер, из которого она разливается в стальные формы. Далее повторяется технологический цикл автоклавирования. Так как вспучивание смеси с пеной завершается в основном в смесителе, то форма заполняется полностью, тогда как при газообразователях наполнение форм бетоном было возможным не более чем на половину их высоты.

При проектировании составов газо- и пенобетонов, газо- и пеносиликатов исходят из необходимости получения заданных пределов средней плотности и прочности с соблюдением наименьшего расхода вяжущего и порообразующего веществ. Учитывают также требования в отношении морозостойкости бетона и технологичности бетонной смеси. Рекомендуются различные методы подбора состава ячеистых бетонов, которые позволяют получать необходимые числовые показатели основных свойств, однако, более целесообразно и в данном случае пользоваться общим методом проектирования оптимальных составов ИСК. Он позволяет получать не только наиболее экономичные

бетоны по своему рациональному составу, но и с комплексом наилучших показателей строительно-технологических и эксплуатационных свойств (закон створа).

Физико-механические свойства ячеистых бетонов характеризуются следующими показателями: маркой по пределу прочности при сжатии образцов-кубов с ребром 150 мм при влажности их $10 \pm 2\%$ по массе и 28-суточном твердении в нормальных температурно-влажностных условиях хранения. По этому показателю ячеистые бетоны разделяются на марки М15, 25, 35, 50, 75, 100, 150 или, согласно ГОСТ 25485—82, на классы: В1; В1,5; В2; В2,5; В3,5; В5; В7,5; В10; по морозостойкости: F15, 25, 50, 75, 100. Для разных целей применяют бетоны с различной прочностью и морозостойкостью. Так, например, конструкционные ячеистые бетоны должны иметь марку по прочности не менее 75 (класс не ниже В5,0), а по морозостойкости — не менее 50.

При изготовлении армированных изделий из газо- и пенобетона, газо- и пеносиликата рекомендуется предварительно подвергать антикоррозионной обработке стальную арматуру. Важны теплотехнические свойства ячеистых бетонов, особенно при использовании их в качестве стеновых и других ограждающих конструкций. Так, например, коэффициент теплопроводности их равен обычно 0,11—0,15 Вт/(м·К), а при уменьшении средней плотности до 250—200 кг/м³ он равен 0,08—0,07 Вт/(м·К), что соответствует хорошим теплозащитным материалам. Эти бетоны имеют также высокую звукопоглощающую и звукоизолирующую способность. Так, при средней плотности 350 кг/м³ коэффициент звукопоглощения составляет 0,7 при частоте волн в среднем интервале 375—500 Гц. По огнестойкости многие ячеистые бетоны превосходят тяжелые цементные бетоны вследствие пониженного содержания в них гидратных соединений, которые являются наиболее уязвимыми к воздействию высоких (экстремальных) температур.

Следует отметить, что прочность, как и другие свойства ячеистых бетонов, обусловлена структурой, ее пористостью и поэтому находится в прямой зависимости от величины средней плотности. Если же средняя плотность остается постоянной, то тогда важнейшими факторами выступают активность вяжущего вещества и оптимальное содержание компонентов в смеси, так что оптимальной структуре ячеистого бетона всегда соответствует комплекс наиболее благоприятных показателей свойств (закон створа).

9.4.5. АРБОЛИТЫ (ДЕРЕВОБЕТОНЫ)

Арболит — искусственный строительный конгломерат, получаемый путем формования и уплотнения (с последующим отвердеванием) правильно подобранной смеси цемента, древесного заполнителя, химических добавок и воды. Изготовление конструкций и изделий из арболита у нас в "стране и за рубежом в достаточной мере традиционно и служит убедительным примером рационального использования древесных отходов. В качестве заполнителя в них чаще всего применяют древесную дробленку, щепу, другие отходы деревообработки, а вяжущим веществом служит портландцемент. Имеется большой опыт изготовления арболита на основе гипса, особенно высокопрочного (а-модификации), каустического доломита и других вяжущих веществ.

По своей структуре арболит различают: плотный, крупнопористый и поризованный, по назначению — теплоизоляционный ($400\text{—}500\text{ кг/м}^3$) и конструктивно-теплоизоляционный ($500\text{—}650\text{ кг/м}^3$); по типу получаемого конгломерата он относится к разновидностям легких бетонов с возможным подразделением их на армированные и неармированные. В зависимости от предела прочности при сжатии образцов-кубов в арболитах выделяют классы В0,35; В0,75; В1, используемые как теплоизоляционные, и классы В1,5; В2; В2,5; В3,5 — как конструктивно-теплоизоляционные. Теплоизоляционный арболит характеризуется марками М5, М10 и М15, конструкционный — М25, М35 и М50. Соответствующие испытания арболита и конструкций из него производят по ГОСТ 19222—84.

Арболит предназначен, в основном, для строительства малоэтажных сельскохозяйственных, промышленных, жилых и культурно-бытовых зданий. Этот материал обладает относительно высокими физико-механическими свойствами, является экологически чистым, легок в технологических операциях при сверлении, обработке режущим инструментом, поддается оштукатуриванию. Он относится к трудносгораемым, морозо- и биостойким, негигроскопичным. Теплопроводность арболита колеблется в пределах $0,09\text{—}0,21\text{ Вт/(м·К)}$. Он обладает малой тепло- и звукопроводностью, достаточно долговечен — срок эксплуатации зданий 20—30 лет и более. Из него изготавливают стеновые панели и блоки, плиты покрытия для совмещенных кровель и плиты перекрытия (усиленные несущей основой), перегородочные плиты и др. По сравнению с панелями из легких бетонов с минеральными заполнителями типа керамзита стеновые панели из арболита имеют меньшую массу (почти в два раза), сниженный расход арматурной стали (в 3—4 раза), меньшую себестоимость, трудоемкость в изготовлении и монтаже. Производство арболитовых изделий осуществляют способом силового вибропроката. Мощность завода, работающего по такой технологии, составляет до 40 тыс.м³ изделий в год.

Однако следует учитывать и некоторые недостатки арболита — повышенный расход цемента; необходимость предварительной обработки древесного заполнителя при использовании портландцемента; повышенное водопоглощение — у теплоизоляционного 60—85%, у конструктивно-теплоизоляционного — 50—70%, пониженную огнестойкость у теплоизоляционных арболитов.

Обработка древесной дробленки и щепы заключается в предварительном их вымачивании в воде для уменьшения содержания экстрактивных веществ, вредно действующих на портландцемент. Более эффективным является кратковременное замачивание в водных 3%-ных растворах сернокислого глинозема или 5%-ных растворах хлористого кальция или растворимого стекла. Вместо портландцемента целесообразнее использовать высокопрочный гипс. Он обеспечивает резкое возрастание оборачиваемости форм, исключает процесс тепловой обработки изделий. Дома из арболита строятся быстрее, стоимость их ниже, меньше затраты труда, что было установлено в научных работах М.И. Клименко и при строительстве жилых домов в сельских районах. На основе портландцемента А.А. Акчабаевым разработана принципиально новая конвейерная

технология арболита с уплотнением его прессованием с одновременной упаковкой отформованных изделий в пакет и обеспечением оптимизации их структуры¹.

В зарубежной практике арболит также широко используют при возведении одноэтажных и высотных зданий различного назначения. Он именуется как дюризол в Швейцарии, вундстоун — в США, пилинобетон — в Чехии, чентерибоад — в Японии, дюрипанель — в Германии, велокс — в Австрии и т. п.

¹ Научно-производственные работы М.И. Клименко и А.А. Акчабаевым выполнялись под научным руководством И.А. Рыбьева

9.4.6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ БЕТОНЫ

Специальными называют бетоны, используемые в специальных конструкциях или монолитных сооружениях. Для них выбирают наиболее целесообразные вяжущие вещества и заполнители, нередко изменяют традиционную технологию или отдельные технологические операции, параметры и, режимы. Понятно, однако, что все разновидности специальных бетонов, независимо от их конкретного функционального назначения, не перестают оставаться представителями ИСК. При оптимальных структурах они показывают комплекс экстремумов свойств, сохраняют другие общие закономерности а также подобие между собой. Вместе с тем каждая разновидность специальных бетонов отличается своими специфическими особенностями, которые должны учитываться при проектировании состава, обеспечении их оптимальной структуры, всегда действующей в определенных условиях изготовления и применения материала и изделий. Ниже рассмотрены некоторые виды специальных бетонов.

Дорожный цементный бетон относится к плотным тяжелым или легким бетонам, применяется для устройства автодорожных покрытий, оснований под асфальтобетонные покрытия, возведения мостовых конструкций и труб.

Маркировку дорожного бетона принято производить по прочности и морозостойкости. По пределу прочности при сжатии классы тяжелого бетона следующие: В5, В7,5, В10, В15, В20, причем для верхних слоев покрытий — классы В22,5 В25, В30, а для нижних слоев — не выше В15 и В20; для легкого бетона — В5, В7,5, В20. В железобетонных конструкциях мостов классы тяжелого бетона В15, В20, В30, В40 и В45. Верхние пределы этих классов применяют для мостовых конструкций из так называемого преднапряженного железобетона, а нижние пределы их — для массивных конструкций: опор, фундаментов, труб и др. По морозостойкости бетоны маркируют в пределах от 100 до 300 циклов замораживания. С целью повышения морозостойкости в бетон вводят добавки для вовлечения до 5—6% воздуха. Такой добавкой, в частности, может быть СНВ (на основе абиетиновой смолы), мылонафт и др. Воздушные пузырьки демпфируют давление льда в порах, что повышает эффект морозостойкости по количеству циклов испытания. Важным свойством бетона служит истираемость, характеризуемая потерей массы образца на 1 см^2 испытываемой поверхности; имитирует сопротивляемость бетонного покрытия воздействию сил, возникающих при проезде транспорта. Более полную характеристику качества материала дает испытание на износ, показателем которого служит потеря массы (%) образца (пробы материала) при испытании в стандартном полочном барабане. Повышение сопротивления истираемости и износу достигают как применением более твердых пород в заполнителе, так и втапливанием в верхний слой свежееуложенного бетона минеральных зерен размером до 5 мм из особо твердых материалов, например кварцита, иногда корунда и др. Стабильность бетонного элемента в известной мере может быть охарактеризована коэффициентом температурного расширения, величина которого с усреднением должна быть не более $10 \cdot 10^{-6}$ на 1°C .

Состав бетонной смеси определяют одним из известных методов, а также общим методом проектирования оптимального состава ИСК. На стадии отбора исходных материалов учитывают, что наилучшей разновидностью вяжущего для дорожного бетона являются портландцемент гидрофобный и пластифицированный, а также обычный, но с пониженным содержанием C_3A (не более 10%), при классе В40 и выше для верхнего слоя покрытий. С уменьшением содержания цемента уменьшаются усадочные деформации, повышается при его оптимуме долговечность бетона. Для предварительных расчетов обычный расход цемента принимается равным $320\text{—}350\text{ кг/м}^3$. Щебень и гравий следует применять промытыми, чтобы снизить содержание глинистых примесей (не более 1% по массе) и исключить органические вещества. Пески желательно использовать крупно- и среднезернистые, природные или полученные дроблением плотных горных пород.

Гидротехнический бетон также является разновидностью плотных тяжелых цементных бетонов; применяется для возведения сооружений, которые периодически или постоянно омываются водой. Гидротехнический бетон должен обладать комплексом технических свойств — прочностью, характеризуемой восемью классами (от В7,5 до В40) по пределу прочности при сжатии, прочностью на растяжение, водостойкостью и водонепроницаемостью, морозостойкостью, характеризуемой семью марками от 50 до 500 циклов стандартного замораживания и оттаивания, малым тепловыделением при твердении и др. Особенно высокие показатели качества нормируют для бетонов, предназначенных для устройства конструкций и сооружений в зонах переменного уровня воды. Соответствующие требования устанавливаются и к качеству материалов для бетона. Так, для подводных зон целесообразно применять шлакопортланд-цемент и пуццолановый портландцемент, которые достаточно водостойки и низкотермичны. Для надводных зон применяют бетоны на основе гидрофобного и пластифицированного портландцемента. К бетонам в наружных частях гидротехнических сооружений предъявляют повышенные требования по прочности (не ниже В20), морозостойкости (не ниже марки 300), водонепроницаемости (не ниже W6 или W8). Повышены требования и к материалам — компонентам бетона. Так, например, портландцемент используется сульфатостойкий, крупный заполнитель должен обладать повышенной морозостойкостью (из плотных горных пород). К бетонам для внутренних частей массивных гидротехнических сооружений также предъявляются свои технические требования: применение шлако-портландцементов с малой и умеренной экзотермией, других портландцементов с активными минеральными добавками, марки бетонов возможны 100 и 150.

Сооружения, работающие в морских условиях, изготовляют из бетона на основе сульфатостойкого портландцемента. В подводных частях сооружений бетон должен надежно противостоять выщелачиванию гидроксида кальция. Этого достигают путем химического связывания его активным кремнеземом с образованием малорастворимых гидросиликатов кальция.

Для особо ответственных гидротехнических сооружений используют цементы, удовлетворяющие специальным техническим условиям.

Вода для затворения бетонной смеси используется в гидротехнических сооружениях с рН не менее 4 и не более 12,5. В ней ограничивается содержание солей, взвешенных пылевато-глинистых примесей, а также ионов SO_4^{2-} и Cl^- .

Жаростойкие бетоны сохраняют свои свойства при продолжительном воздействии высоких температур в тепловых агрегатах (футеровка туннельных печей и вагонеток, фундаменты под промышленные печи и трубы и т. п.) или кратковременном, ударном воздействии теплоты, сопровождающемся значительными температурными перепадами. Применяют как конструктивный и футеровочный материал.

Обычный тяжелый бетон способен стабильно сохранять или даже несколько увеличивать прочность при длительном нагревании до 100°C. При дальнейшем повышении температуры может возникнуть явление постоянного упрочнения за счет ускорения процессов гидратации. Однако при температурах выше 140—150°C обычно отмечается снижение прочности с ухудшением других свойств, так как частично разрушаются кристаллические гидратные новообразования, а также гидросиликатная фаза, главным образом в связи с удалением цеолитной воды. И хотя с некоторым риском можно допустить кратковременное подогревание бетонных конструкций до 200°C, все же дальнейшее повышение их температур в пределах 200—1700°C требует применения жаростойких (при температурах до 1580°C) или огнеупорных (1580—1770°C) бетонов.

Жаростойкие и огнеупорные бетоны могут быть особо тяжелыми, тяжелыми, легкими и облегченными, ячеистыми. Их получают на основе как гидравлических, так и воздушных вяжущих веществ: портландцемента, глиноземистого и высокоглиноземистого цемента, алюмофосфатного вяжущего, жидкого стекла с отвердителями, например

кремнефтористым натрием (Na_2SiF_6), нефелиновым шлаком, феррохромовым шлаком. В качестве заполнителей употребляют хромитовые руды, бой магнезита, щебень из базальтов и диабазов, шамотный кирпичный щебень (бой) и др. В жаростойкие бетоны на основе портландцемента добавляют тонкомолотые активные минеральные вещества, обладающие, как и крупные заполнители, высокой огнеупорностью. Для огнеупорных бетонов используют высокоглиноземистый цемент, который к тому же имеет незначительную усадку и малый коэффициент термического расширения. Хорошо зарекомендовали себя фосфатные связующие (алюмофосфатное, алюмосиликатофосфатное, хромофосфатное и др.). Они позволяют получать огнеупорные бетоны, в том числе легкие, с применением в них вермикулитового, перлитового, керамзитового заполнителей, боя легковесных огнеупоров и т. п.

В жаростойкие ячеистые бетоны, в частности газобетоны, кроме портландцемента и алюминиевой пудры вводят тонкомолотый шамот, золу-унос, керамзит и др. Эти бетоны могут эксплуатироваться в условиях температур до 1200°C при сохранении прочности $2,5\text{—}5,0$ МПа и средней плотности $600\text{—}800$ кг/м³. Разработан состав особо легкого жаростойкого бетона, в который входят быст-ротвердеющий портландцемент, тонкомолотая силикат-глыба и легкие пористые и волокнистые заполнители. Этот бетон используют при температурах до 1000°C , а его средняя плотность в высушенном состоянии 300 кг/м³, прочность при сжатии $0,2$ МПа. Теплопроводность при 20°C равна $0,09$ Вт/(м·К), а при 600°C — $0,20$ Вт/(м·К).

Структурообразование жаростойких бетонов происходит на стадии изготовления изделий и в условиях воздействия высоких температур, хотя последние могут приводить к его упрочнению (например, за счет уплотнения геля) и деструкции (например, за счет дегидратации кристаллогидратов) при применении гидравлических вяжущих веществ.

Из побочных продуктов промышленности как компонентов жаростойких бетонов применяют наиболее перспективные, например алюмохромовый продукт — тонкодисперсный порошок отработавшего катализатора в нефтехимическом производстве. Он имеет развитую поверхность (до 5000 см² в 1 г вещества) и высокую огнеупорность (до 2000°C). Его содержание в вяжущем веществе, как показали исследования в НИИКерамзит, приводит к увеличению прочности и огнеупорности смешанного вяжущего на портландцементе и глиноземистом цементе при высоких температурах, например выше 1500°C . Исследования по жаростойким бетонам продолжаются (рис. 9.17). В частности, достигнуты успехи в области получения бетонов высшей огнеупорности, которые в зависимости от их состава сохраняют прочность и другие свойства в заданных пределах при температурах свыше $2000\text{—}2500^\circ\text{C}$. Их изготавливают на основе цир-конийсодержащих вяжущих и с применением тугоплавких заполнителей. При температурах выше 1200°C прочность бетонов повышается за счет спекания смеси, особенно в области температур до 2000°C . Бетоны на цирконийсодержащих цементах являются перспективными для футеровки тепловых агрегатов, а также в других отраслях техники высоких температур в энергетической, металлургической, химической и ядерной промышленности. Жаростойкие газобетоны используют в виде крупных блоков и монолитных конструкций. Они в $2\text{—}3$ раза дешевле фасонных огнеупорных изделий и, главное, позволяют индустриализировать строительство. Понятно, что при нагреве прочность бетона не остается постоянной и чем ближе температура к предельно допустимой, тем больше прочность бетона отклоняется от первоначальной (марочной). Однако она остается достаточной, чтобы сохранить структуру бетона, особенно его матричной части, на необходимом уровне, обеспечивающем прочность в пределах требуемого минимума. Следует отметить, что алюмофосфатные вяжущие и жидкое стекло с отвердителями обеспечивают сохранение остаточной прочности бетона более высокой по сравнению с другими вяжущими веществами (рис. 9.17).

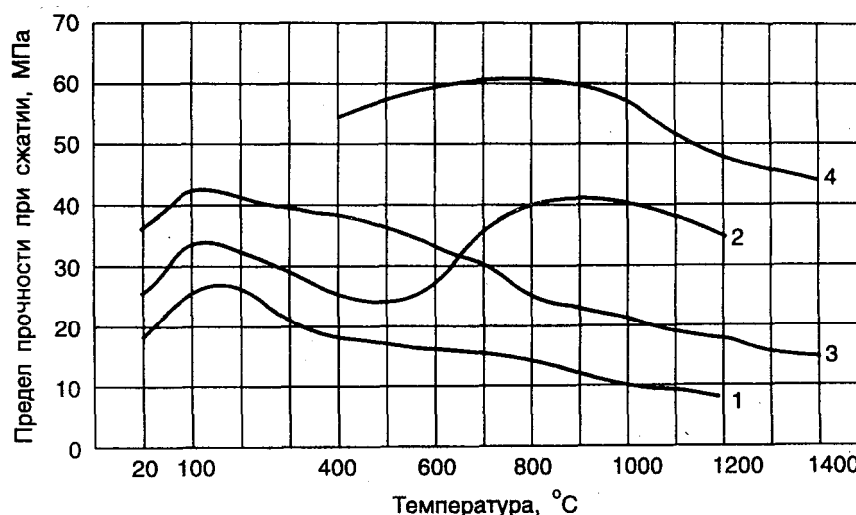


Рис. 9.17. Изменение предела прочности при сжатии жаростойкого бетона на основе различных вяжущих:

1 — портландцемента, 2 — жидкого стекла с нефелиновым шламом, 3 — высокоглиноземистого цемента, 4 — фосфатного связующего

Кислотоупорный бетон — разновидность ИСК, получаемая на основе специального — кислотоупорного — цемента и с применением кислотостойких заполнителей. Его применяют для изготовления конструкций, которые контактируют с большинством известных кислот. Меньшую стойкость этот бетон проявляет к действию плавиковой кислоты, а также к слабым кислотам, воде и растворам щелочи. Эта разновидность кислотоупорного материала применяется не только в виде бетона, но и строительного раствора, мастики, т. е. без крупных заполнителей.

Кислотоупорный цемент состоит из смеси тонкоизмельченного кварцевого песка и кремнефтористого натрия (Na_2SiF_6), затворяемых водным раствором силиката калия или натрия, т. е. жидким стеклом. Вместо кремнефтористого натрия в качестве отвердителя могут быть применены более доступные вещества, например нефелиновый шлак, некоторые разновидности шлаков и др. К кислотостойким заполнителям относятся кварцевый песок и щебень из андезита, диабаз, базальта, кварцита и т. п.

Отдозированные материалы-компоненты по рекомендуемому составу бетона перемешивают до однородного состояния с одинаковым содержанием каждой фракции в каждом микрообъеме смеси. После перемешивания смесь переводят в прессовый цех, где изготавливают штучные изделия — резервуары, трубы, химическую аппаратуру и др. Твердению изделий благоприятствует воздушно-сухая среда с температурой не ниже 10°C и относительной влажностью воздуха не выше 70%. После затвердевания бетон характеризуется прочным сцеплением со стальной арматурой, но под влиянием кипящей воды, слабых кислот и щелочей, кремнефтористоводородной кислоты бетон, как отмечено выше, постепенно разрушается.

Гидроизоляционный бетон применяют для гидроизоляции шахт, подвалов, зачеканки швов, устройства гаражей, очистных сооружений, метротоннелей и в жилых зданиях, в случаях, когда требуется надежная гидроизоляция в гражданских и промышленных сооружениях. Для изготовления такого бетона (в том числе мелкозернистого, т. е. раствора) используют гидравлическое быстросхватывающееся и быстротвердеющее вяжущее вещество, получаемое совместным помолотом портландцементного клинкера (65—70% по массе), алюминатных, сульфоалюминатных или сульфоферритных веществ (10—20%) и гипса (8—15%), более детально описанного выше как напрягающий цемент (см. 9.1.4), а также расширяющийся цемент. При твердении теста до образования цементного камня в бетоне оптимальной структуры происходит увеличение объема кристаллической фазы за счет образования в основном этtringита. Дополнительная кристаллизация приводит к уплотнению структуры, которая к этому времени успевает получить некоторый объем усадочных деформаций (физических, контракционных) и поэтому

нуждается в ее доуплотнении. Бетон становится практически водонепроницаемым, гидроизоляционным. Не наблюдается фильтрации через толщу такого бетона при давлении воды до 2 МПа. Возрастают также морозо- и износостойкость, стойкость к агрессивной среде.

Изготавливают гидроизоляционный бетон в следующей последовательности: напрягающий цемент смешивают насухо с заполняющей частью бетона (песок плюс щебень), а затем общую смесь затворяют необходимым количеством воды. Свежеприготовленный бетон в опалубке уплотняют глубинным или поверхностным вибратором, поддерживая затем поверхность конструкции во влажном состоянии до полного отвердевания и распалубки. Расход исходных материалов устанавливается общим методом проектирования состава, изложенного выше, то же — состава раствора при его использовании вместо бетона. Раствор наносят вручную или торкретированием.

Особо тяжелые и гидратные бетоны применяют в специальных сооружениях — ядерных реакторах, атомных электростанциях, рентгеновских кабинетах и т. п. для биологической защиты от радиоактивных (рентгеновских, γ -, α -, и β -лучей и др.) воздействий. Для особо тяжелых бетонов характерным свойством является большая средняя плотность, равная от 2,5 до 6,0 т/м³. Гидратные бетоны отличаются повышенным количеством химически связанной воды — более 3% по массе, а следовательно, и ядер водорода. Вследствие этого водород, обладая малой молекулярной массой, способствует захвату потока горячих нейтронов, γ -лучей и др. Кроме того, эти бетоны обладают достаточно высокой теплостойкостью, теплопроводностью, малой усадкой, хотя полностью исключить усадку и появление трещин на границе контакта цементного камня и металлического заполнителя — задача сложная.

В качестве вяжущих веществ в особо тяжелых бетонах используют портландцемент, пуццолановый портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый цемент, гипсоглиноземистый (расширяющийся) цемент, в гидратных бетонах — глиноземистый, расширяющийся, быстротвердеющий, самонапрягаемый и др. Все они в той или иной мере способствуют максимальному химическому и адсорбционному удержанию воды в цементном камне и бетоне.

В частности, напрягающий цемент уплотняет структуру бетона, почти полностью исключает усадку. Зона контакта становится плотной и без трещин.

Заполнителями в особо тяжелых бетонах служат весьма тяжелые (с высокой плотностью) магнетит, гематит, барит, металлический скрап, обрезки железа и т. п. Песчаные фракции обычно составляют дробленый бурый железняк, кварцитовые «хвосты», «чугунная дробь» и др.

Повышают защитные свойства особо тяжелых бетонов введением дополнительных веществ, например карбида бора, хлористого лития, сернокислого кадмия и др., в которые входят соответствующие легкие элементы (бор, литий, кадмий и т. д.).

Заполнителями в гидратных бетонах служат лимонит с гидрогетитом (бурый железняк), серпентин и др., содержащие химически связанную воду, горные породы и минералы. Качество заполнителей для этих видов бетона контролируют по их плотности, минимальной прочности при сжатии, водопоглощению. Их показатели нормируются в определенных допускаемых пределах.

Оптимальные составы особо тяжелых и гидратных бетонов как типичных разновидностей ИСК проектируют общим методом. Были предложены также специальные методы. При проектировании оптимального состава важно обеспечить необходимые технические требования к составляющим материалам и бетону, особенно способность задерживать радиоактивные излучения. Это свойство оценивается толщиной слоя материала, при котором поток излучения ослабевает в 2 раза по сравнению с первоначальным. В связи с этим необходимо учитывать показатель средней плотности (ρ_0) бетона, определять фактическое содержание химически связанной воды, что производится расчетом по

формуле $H\rho_0$, где H — необходимое содержание водорода в бетоне. Учитывают также прочность, бетона, которая должна находиться в пределах марок 100—300 (по сжатию). Особо тяжелые и гидратные бетоны изготавливают по обычной технологии с применением бетоносмесителей для перемешивания отдозированных компонентов и вибраторов для уплотнения свежесформованных бетонных изделий.

Архитектурные, или декоративные бетоны — разновидность специальных высококачественных ИСК, которые обладают повышенными декоративно-эксплуатационными характеристиками. Их используют в виде фасадных элементов, скульптурных горельефов и барельефов, других изделий архитектурного назначения. Наиболее часто в них используются белые и цветные цементы и строго ограниченной крупности зернистые заполнители, в том числе искусственного дробления мраморов, гранита, кварцита и других горных пород, добавки — отбеливающие, модифицирующие, пластичные и др. Бетонным смесям придают необходимую технологическую подвижность, оптимальные составы с получением оптимальных структур отвердевших и отработанных с поверхности конструктивных деталей¹. *Серные бетоны* — разновидность спецбетонов, получаемых на основе элементарной (технической) серы, полимерного компонента, минеральных заполнителей и наполнителей. В них отсутствуют неорганические вяжущие вещества и вода. Матричная часть бетонов представлена тесной смесью связующего и наполнителя, подобно тому, как в асфальтовых бетонах матрицей является асфальтовое вяжущее вещество (см. 10.3.1). В качестве полимерного вещества в серу добавляется дициклопентадиен или стирол, хлорпарафин и др. Вместо элементарной серы возможно использование серосодержащих отходов, например, хвостов отстоя (до 40 % серы), золы отстоя (до 70 % серы). Наполнителем служат микрокремнезем, маршаллит, андезитовая мука и некоторые другие порошкообразные минеральные материалы с удельной поверхностью равной 2700—3000 см²/г. Заполнителями в серном бетоне служат щебень горных пород различных фракций и кварцевые пески.

Технология получения этого бетона начинается с производства связующего компаунда путем сплавления серы с полимерным веществом в определенных соотношениях частей по массе при температуре 145—150°C. Бетонная смесь получается после тщательного перемешивания отдозированных минеральных компонентов (заполнителя и наполнителя) со связующим компаундом в барабанном смесителе в горячем состоянии (подобно асфальтобетону). Изготовленная бетонная смесь отправляется на формование и уплотнение, обычно вибрационное. Отвердевание происходит при остывании конструкции до эксплуатационной температуры, и бетон быстро набирает прочность. Возможно его армирование стальной или стекло-пластиковой арматурой.

По средней плотности эта разновидность специального бетона разделяется на тяжелые (2300—2500 кг/м³), легкие (800—1600 кг/м³) и особо легкие — теплоизоляционные (300—400 кг/м³). Предел прочности при сжатии двух первых соответственно равен 60—80 и 50—60 МПа, а растяжение при изгибе 12—14 и 11—12 МПа. Водопоглощаемость за 24 ч составляет 0,05—0,07 %. Бетон обладает высокой химической стойкостью. Используется в виде плит для полов на складах минеральных удобрений, в силосных башнях, дорожных и тротуарных плит, бортовых камней, в сборных конструкциях на промышленных и сельскохозяйственных предприятиях.

Электроизоляционные бетоны являются специальной разновидностью бетонов, обладающей повышенными и стабильными диэлектрическими свойствами в течение длительных периодов эксплуатации высоковольтных воздушных линий электропередачи и подстанций в различных климатических зонах с сохранением необходимой механической прочности и долговечности соответствующих строительных конструкций.

¹ Архитектурный бетон: комплексное управление эксплуатационными и декоративными характеристиками / Н.Ф. Башлыков, В.Р. Фаликман, Ю.В. Сорокин, В.В. Денискин: Сб. трудов I Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона, Т. 2, М., 2001.

Основные свойства таких бетонов характеризуются следующими показателями: электрической прочностью в слое толщиной 1 см: импульсной ($1 \cdot 10^{-6}$ с) — 60—140 кВ/см и при переменном токе (50 Гц) — 20—60 кВ/см; средней разрядной напряженностью на длине 1 м — около 3,0 кВ/см; удельным электрическим сопротивлением при 20°C — объемное 10^9 — 10^{11} Ом·м; тангенсом угла диэлектрических потерь (50 Гц, 20°C) — 0,05—0,20; диэлектрической проницаемостью (50 Гц, 20°C) — 6—10; механической прочностью: при сжатии — 40—150 МПа, при растяжении — 3—11 МПа; средней прочностью 2000—2400 кг/м³; водопоглощаемостью (по массе) менее 1%; морозостойкостью — не менее 100. Лучшими показателями обладают бетоны на основе портландцемента с добавлением микрокремнезема¹.

Электроизоляционные бетоны подвергают армированию неметаллической арматурой в виде стеклопластиковых стержней с использованием способа предварительного напряжения. Возможно применение дисперсного армирования стеклянными и базальтовыми волокнами изделий из электроизоляционного бетона. Требования в отношении оптимизации структуры цементного камня, как матрицы, и бетона в полной мере сохраняются, как для других ИСК. Объемная пропитка мономерами и их полимеризация, а также вторичная просушка, активизация поверхности зернистого заполнителя являются эффективными мерами повышения диэлектрических свойств бетона.

¹ *Бернацкий А.Ф.* Электроизоляционный бетон для электроэнергетического строительства. Автореферат докт. диссерт. Новосибирский ГАСУ, 2001.

9.5. ЖЕЛЕЗОБЕТОН — ИЗДЕЛИЯ, КОНСТРУКЦИИ

9.5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Железобетон — комплексный строительный материал с конгломератным типом структуры, в котором бетон и стальная арматура замоноличены взаимным сцеплением и работают под нагрузкой как единая система. Бетон в ней воспринимает сжимающие усилия, а стальная арматура — растягивающие, поскольку аналогично другим каменным искусственным и природным материалам бетон сопротивляется разрыву в 10—15 раз слабее, чем сжатию. Строительные конструкции зданий и сооружений, выполненные из железобетона, называются железобетонными. В обычных случаях стальная арматура в них свободно размещается в зонах повышенных растягивающих усилий, но в современном строительстве она, кроме того, подвергается предварительному натяжению путем приложения сил по ее растяжению. Такие железобетонные конструкции становятся предварительно напряженными. В них стальная арматура, оставаясь в пределах упругих деформаций (85—90% предела текучести стали), стремится вернуться в свое недеформированное состояние после отпуска натяжных приспособлений. Это стремление выражается в обжатии зон бетона, в которых под воздействием внешних сил возникли растягивающие усилия. Обжатие упрочняет бетон на растяжение и изгиб (рис. 9.18), что благоприятствует упрочнению всей конструкции.

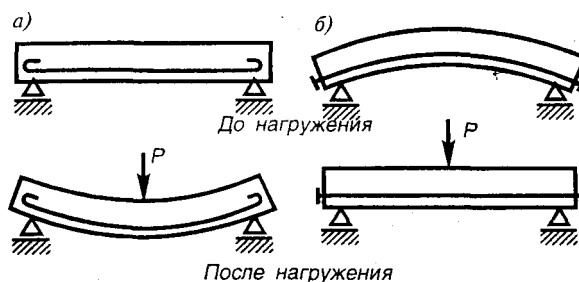


Рис. 9.18. Работа железобетонной балки при изгибе:
а — с обычной арматурой; б — с предварительно напряженной арматурой

Предварительное натяжение арматуры осуществляют либо до бетонирования конструкции или изделия, либо после этого. В первом случае арматуру сначала натягивают, концы ее прочно закрепляют в бортах формы изделия, после чего бетонируют форму. После отвердевания уплотненной бетонной смеси арматуру освобождают от натяжного устройства. Во втором случае арматуру располагают в каналах бетонной конструкции, созданных ранее с помощью специальных пустотообразователей, и натягивают ее после того, как бетон приобретет необходимую (расчетную) прочность. Затем натянутую арматуру заанкеривают на концах конструкции, а каналы замоноличивают цементным раствором или бетонной смесью.

Натяжение арматуры производят механическим путем (домкратами) или методом электротермического воздействия.

Железобетонные изделия и конструкции выполняют из монолитного, сборного и сборно-монолитного железобетона. Монолитные бетонируют в опалубке на месте строительных работ; сборные изготовляют на заводах сборного железобетона и в готовом виде доставляют на строительную площадку для их монтажа при возведении зданий или сооружений. С каждым годом возрастает количество сборно-монолитного железобетона, под которым понимается рациональное сочетание этих двух разновидностей, работающих под нагрузкой как единая железобетонная система. Сборный железобетон одновременно выполняет и функции своеобразной опалубки для монолитного железобетона, который в свою очередь обеспечивает необходимую пространственную жесткость. Такие конструкции особенно целесообразны для зданий и сооружений тяжелыми и динамическими нагрузками, в районах высокой сейсмичности, в тепло- и гидростанциях и

т. п. Для изготовления железобетона используют не только тяжелый, но также легкие, в том числе ячеистые бетоны. Их основой могут быть портландцемент, известково-кремнеземистое вяжущее вещество (силикатные бетоны) и др. Соответствующие железобетонные изделия могут быть сплошными и пустотелыми, иметь различные типоразмеры. По назначению железобетонные изделия и конструкции разделяют для жилых и общественных зданий; промышленных зданий; инженерных сооружений; изделия общего назначения. В строительных объектах широко используют железобетонные перекрытия, ограждающие (стеновые) и несущие перегородочные панели, ленточные марши и площадки, фундаментные плиты, блоки.

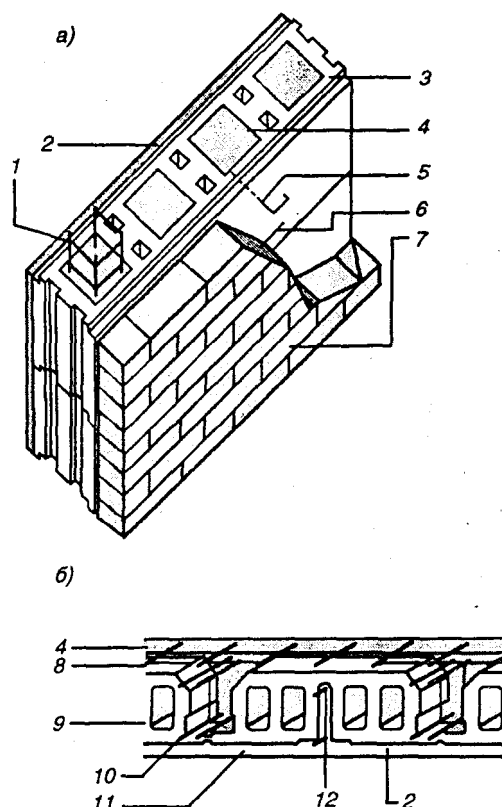


Рис. 9.19. Элементы «Пластбау» в стенах (а) и междуэтажном перекрытии (б):

1 — арматура; 2 — просечная сетка; 3 — стеновой блок «Пластбау»; 4 — бетон; 5 — анкер для крепления облицовки; 6 — арматура; 7 — лицевой кирпич; 8 — арматурная сетка; 9 — междуэтажный элемент «Пластбау»; 10 — арматура несущей балки; 11 — штукатурка; 12 — ребро жесткости

В каркасно-панельных зданиях основной несущей конструкцией служит железобетонный каркас. Он состоит из колонн и горизонтальных связей - ригелей. Плиты перекрытий опираются на ригели, при безригельной схеме — на колонны, в бескаркасных зданиях — на крупные плитные элементы: панели стен, перегородок и перекрытий. Продолжает развиваться строительство домов и из сборных элементов с монтажом их на строительных площадках. Здесь могут быть особо уместными так называемые трехслойные панели системы «Пластбау» для стен и перекрытий (рис. 9.19). Пено-полистирольный элемент является одновременно и опалубкой, и утеплителем. Слой конструктивного железобетона расположен между двумя слоями теплоизолятора. Элементы «Пластбау» имеют массу 2,5 кг/м³, плотность 25—30 г/л, звукопоглощение 40 дБ, коэффициент теплопередачи 0,25 ккал/м²·ч·К. Расход энергозатрат на обогрев таких домов снижается в 3—5 раз по сравнению с традиционными домами с железобетонными каркасами.

Санитарно-технические элементы для сети водопровода, канализации, отопления и вентиляции, мусоропроводов также при необходимости выполняют на основе

железобетона. Металлические трубы водопроводной и канализационной сети, трубы горячего водоснабжения замоноличивают (в процессе изготовления на заводе) в тело железобетонных блоков и панелей. Такие изделия и детали к ним, доставленные на строительную площадку, позволяют собрать канализационную или водопроводную сеть путем стыкования замоноличенных в них металлических труб.

В качестве элементов вытяжной вентиляции применяют блоки в виде прямоугольных железобетонных изделий с круглыми или прямоугольными отверстиями. Ширина таких блоков зависит от числа вытяжных отверстий, а длина — от высоты помещения.

К достижениям сборного железобетона в санитарной технике, значительно ускоряющим процесс монтажа зданий, относится применение готовых кабин санитарных узлов. Санитарно-технические кабины доставляют на строительную площадку в законченном виде и после установки включают в общую сеть канализации, горячего и холодного водоснабжения.

В промышленных большепролетных зданиях используют разнообразные своды-оболочки, в том числе двойной кривизны, винтовые (висячие) конструкции тонкостенных покрытий, цилиндрические и щедовые оболочки и другие пространственные покрытия. Перекрытия многоэтажных производственных и общественных зданий устраивают по балочной или безбалочной схемам. В них присутствуют разрезные и неразрезные прогоны различного сечения (прямоугольного, таврового, двутаврового и др.), а также колонны, ригели и др.

Из сборного железобетона возводят и специальные сооружения: резервуары, водонапорные башни, бункера, силосы, дымовые трубы, напорные и безнапорные трубы, градирни и т. п. На атомных электростанциях устанавливают железобетонные ограждения против радиации. Ассортимент сборных и монолитных железобетонных конструкций и изделий поистине неисчерпаем. В частности, в тонкостенных элементах несущих и ограждающих конструкций находят возрастающее применение армоцементные материалы. Армо-цемент — конгломератный материал, в котором мелкозернистый (песчаный) бетон и тонкая равномерно распределенная по его сечению сетчатая стальная арматура работают под нагрузкой как одна монолитная система. Такой материал используют при изготовлении тонких плит (скорлуп) в пространственных покрытиях зданий и сооружений. Этому благоприятствует надежное сочетание прочного и плотного песчано-цементного бетона с пакетом тонких плетеных или сварных проволочных сеток. Армоцемент обладает более высокой трещиностойкостью, огнестойкостью, водонепроницаемостью и морозостойкостью, чем обычный железобетон. Его использование в строительстве позволяет снизить массу конструкций и затраты материально-энергетических ресурсов.

Широкое применение железобетона обеспечивает экономию металла и древесины в строительстве, способствует повышению эффективности труда и темпов строительных работ. Этот материал продолжает оставаться основным для современного капитального строительства, а теория железобетона развивается и совершенствуется как в нашей стране, так и за рубежом. Исходным положением теории остается совместная работа бетона и стальной арматуры в конструкции. Оно основано на следующем: сталь и бетон при изменении температуры в интервале от 0°C до 80°C имеют практически одинаковые коэффициенты линейного расширения, равные $0,00001^1$; между бетоном и арматурой возникают в процессе отвердевания железобетона значительные силы сцепления, препятствующие скольжению арматуры в бетоне (для бетонов средних марок напряжение сцепления равно $2,5 \cdot 1,0$ МПа); стальная арматура достаточно надежно защищена бетоном от коррозии даже при возникновении трещин до 0,3 мм в растянутых зонах, так как вокруг арматуры щелочная среда создает защитную пленку.

Для увеличения сцепления на концах гладких стержней устраивают крюки, придают арматуре периодический профиль, применяют сварные сетки, используют некоторые

¹ Более точные интервалы этих коэффициентов: для бетона $(0,7—1,48) \cdot 10^{-5}$ град⁻¹, для стали $1,1 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹.

разновидности стальных анкеров (коротыши, шайбы, кольцевые петли и др.). При температурах свыше 100°C прочность железобетона снижается: при $200\text{—}250^{\circ}\text{C}$ — на 25%, при $500\text{—}600^{\circ}\text{C}$ бетон теряет прочность и разрушается. Чтобы защита арматуры от коррозии (и высоких температур) была более эффективной, защитный слой бетона устраивают в растянутых зонах конструкций от 10 до 30 мм, что также благоприятствует и повышению сцепления арматуры с бетоном.

9.5.2. ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Для сборного железобетона используют цементные бетоны классов В15 и В20 (марок М200 и М300); для напряженно-армированных конструкций наиболее целесообразны бетоны классов В45 и В50 (марок М400 и М500) и выше. В качестве вяжущих веществ для предварительно напряженных бетонов применяют быстротвердеющие и особо быстротвердеющие цементы, позволяющие значительно сократить продолжительность тепловлажностной обработки.

Армируют железобетонные конструкции стальной арматурой в виде стержней и проволоки (рис. 9.20). Стержневая арматура может быть горячекатаной, термически упрочненной и упрочненной в холодном состоянии. Арматурные стержни используют гладкого или периодического профилей. Периодический профиль арматуры получают при горячей прокатке или сплющиванием стержней в холодном состоянии на специальных станках. В зависимости от механических свойств горячекатаную арматуру разделяют на классы: А-I (гладкая), А-II, А-III, А-IV и А-V (периодического профиля). Арматура может иметь специальное назначение классов АТ-IVс и АТ-Vс и диаметр до 32 мм.

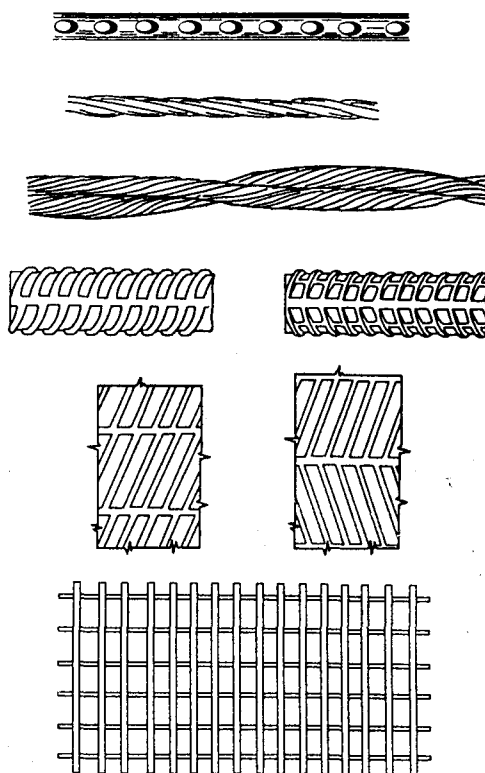


Рис. 9.20. Стальная арматура для железобетонных конструкций

Для армирования железобетонных конструкций применяют свариваемые стержни диаметром от 6 до 80 мм. Арматурную холоднотянутую проволоку изготавливают гладкой (классов В-1 и В-2) или периодического профиля (классов Вр-I и Вр-II). При использовании напрягаемой арматуры отдается предпочтение классам А-V, А-VI, Ат-V и Ат-VI, а также высокопрочной проволоке и получаемым из нее канатам. Широкое применение получили плоские и пространственные арматурные сетки.

Кроме рабочей арматуры (обычной и предварительно напряженной) при изготовлении железобетонных изделий и конструкций используют арматуру монтажную и распределительную. Количество рабочей арматуры устанавливают расчетом; монтажной и распределительной — по конструктивным соображениям. Продольные рабочие стержни, укладываемые в зоны растягивающих напряжений, объединяют поперечной арматурой в

каркасы, опирающиеся на специальные фиксаторы. При стыковании сборных конструкций и изделий используют стальные закладные детали, выполняемые из фасонного проката или в виде фасонных сварных профилей. Их изготавливают из стали класса А-I или других хорошо сваривающихся сталей. Листы должны быть толщиной не менее 4 мм; при уменьшении толщины во время сварки получаются «прожоги». В табл. 9.8 приведены характеристики наиболее широко употребляемой стальной арматуры.

Таблица 9.8. Характеристики стальной арматуры

<i>Класс арматуры</i>	<i>Марка стали</i>	<i>Диаметр, мм</i>	<i>Нормативные значения</i>	
			<i>предела текучести, МПа, не менее</i>	<i>временного сопротивления разрыву, МПа, не менее</i>
А-I	Ст. 3 сп3	6—40	240	—
А-II	ВСт5 сп2	10—40	300	—
	10 ГТ	10—32	300	—
А-III	35ГС	6—40	400	—
	25Г2С	6—40	400	—
А-IV	80С	10—18	600	—
	20ХГ2Ц	10—22	600	—
А-V	23Х2Г2Т	10—22	800	—
Ат-IV	—	10—25	600	—
Ат-V	—	10—25	800	—
Ат-VI	—	10—25	1000	—
В-I	—	3—5	—	550
Вр-I	—	3—5	—	500—525
В-II	—	3—8	—	1900—1400
Вр-II	—	3—8	—	1800—1300

Кроме стальной арматуры в последнее десятилетие получила распространение во многих странах (США, Японии, Германии, Англии, Франции, Финляндии) неметаллическая арматура, в которой применяют углеродные, борные и другие виды волокон. В нашей стране в основном используется стеклопластиковая арматура, изготавливаемая из алюмоборосиликатных волокон и применяемая в предварительно напряженных конструкциях взамен высокопрочной проволоки Вр-II и канатов. Представляет интерес изготовление базальто-пластиковой арматуры для армирования ненапрягаемых конструкций. Конструкции из такой арматуры долговечнее, чем со стальной. Связующее вещество склеивает волокна в монолитный стержень, работающий как единый элемент, защищенный от механических повреждений, влаги, агрессии.

9.5.3. ПРОИЗВОДСТВО СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

Сборные железобетонные изделия и конструкции изготавливают на заводах, полигонах и специальных предприятиях. Технология их изготовления включает следующие основные производственные операции: подготовка составляющих материалов; приготовление бетонной смеси; изготовление арматуры; армирование и укладка бетонной смеси; формование изделий (укладка бетонной смеси и уплотнение); твердение изделий, обычно в условиях тепловлажностной обработки. Отдельные виды изделий (стенные панели и блоки, лестничные площадки и т. п.) подвергают дополнительной обработке — облицовке поверхности, укладке теплоизоляционных слоев и др. Лицевую поверхность панелей и блоков, например, отделывают декоративным бетоном или раствором, керамическими плитками либо обрабатывают гидрофобизирующими составами.

Операции по подготовке составляющих материалов и приготовлению бетонной смеси были описаны выше. Изготовление ненапрягаемой арматуры сводится к подготовке прутковой и проволочной арматуры на заводе, т. е. чистке, правке, резке и гнутью; сварке арматурных элементов и укрупненной сборке объемных арматурных каркасов. Стержни малого диаметра и проволочные прутки при изготовлении арматурных сеток и плоских каркасов сваривают контактной точечной электросваркой. Цилиндрические арматурные каркасы (наружный и внутренний) для армирования труб и других изделий изготавливают на навивочно-сварочной машине.

При армировании предварительно напряженных железобетонных изделий и конструкций натяжение арматуры может производиться различными способами: механическим, электротермическим и химическим (при использовании энергии расширения специальных видов цемента).

Формование изделий — один из важнейших технологических переделов и состоит из сборки форм, установки арматуры, укладки бетонной смеси в форму и уплотнения.

Качество железобетонных изделий в значительной степени зависит от прочности и жесткости форм, которые должны обеспечить получение изделий точно заданных размеров с правильными очертаниями и достаточно гладкой лицевой поверхностью. При массовом изготовлении изделий применяют только металлические формы. После того как форма собрана, очищена и смазана, в нее укладывают арматуру и бетонную смесь.

При изготовлении железобетонных изделий особого внимания требует формование многопустотных панелей, труб и крупнообъемных элементов. Формование многопустотных панелей и настилов производят в специальных формах с помощью выдвижных пустото-образователей — вибросердечников.

Формование железобетонных труб осуществляют в горизонтальных или вертикальных формах. Вертикальное формование труб целесообразно при изготовлении колец большого диаметра (1,5—3 м) с толстыми стенками.

Крупнообъемные монолитные элементы (блок-комната) формируют на специальных установках.

Монолитные блоки изготавливают или в виде «колпака», когда вертикальные стены бетонируют вместе с несущим потолком, а снизу присоединяют отдельно изготовленную несущую панель междуэтажного перекрытия, или в виде «стакана» с последующим прикреплением сверху несущего потолка. Уложенную в форму бетонную смесь уплотняют на виброплощадках или с помощью поверхностных и глубинных вибраторов. При бетонировании конструкций из жестких, малоподвижных бетонных смесей используют комбинированные способы. Виброуплотнение, вибропрессование, вибрирование с пригрузом позволяют плотно уложить жесткие и особожесткие смеси с водоцементным отношением, равным 0,35 и ниже. На виброплощадке изделие может дополнительно прессоваться под нагрузкой 0,05—0,15 МПа. В технологии бетона и железобетона известны и другие способы уплотнения жестких смесей — виброштампо-

вание, вибровакуумирование, центрифугирование. Так, например, скорость вращения форм в станках-центрифугах равна обычно от 600 до 1000 об/мин, в зависимости от уплотняемой бетонной смеси и размеров изделий. В настоящее время разработаны роликовые центрифуги на пневматических шинах (вместо металлических катков), что снижает шум при их работе, обеспечивает дополнительное уплотнение за счет вибрирования и заглаживания бетонной смеси валиком-катком, находящимся внутри формы.

Твердение железобетонных изделий происходит в естественных условиях или при тепловлажностной обработке, позволяющей ускорить завершение этого процесса. В зависимости от температуры и влажности окружающей среды различают: а) пропаривание в камерах периодического и непрерывного действия при нормальном давлении и температуре 70—100°C; б) автоклавную обработку насыщенным паром при его давлении 0,8—1,3 МПа и температуре 174—193°C; в) контактный обогрев путем непосредственного соприкосновения изделия с источником теплоты (острым паром, горячей водой или нагретым маслом) или нагревательным прибором, обогреваемыми стенками формы; г) электропрогрев — пропускание электрического тока через толщу бетона или обогрев его инфракрасными лучами, особенно при изготовлении тонкостенных изделий в кассетах при достаточной их герметизации. Кроме того, используют метод горячего формования, при котором бетонная смесь перед укладкой в форму в течение 8—12 мин разогревается электрическим током до температуры 75—85°C и выдерживается в форме 4—6 ч. После выдержки в форме бетон приобретает необходимую распалубочную прочность (около 70% проектной).

Пропаривание производится в камерах периодического или непрерывного действия. Из камер пропаривания периодического действия широкое применение имеют камеры ямного типа глубиной до 2 м. Наиболее рациональный размер камер пропаривания в плане должен соответствовать кратным размерам изделий, которые подаются в камеру в формах или на поддонах. Стенки камер делают бетонными. Закрывают камеры массивными крышками с водяными затворами, препятствующими потере пара. Пар в камеру подают так, чтобы обеспечить повышение температуры со скоростью 20—35°C в час, до максимальной — 85—90°C. При этой температуре изделие прогревается на всю толщину и выдерживается в таком состоянии 6—8 ч. После изотермической выдержки начинают постепенное охлаждение изделия. Продолжительность пропаривания зависит от разновидности бетона, свойств цемента и составляет около 12—15 ч для пластичных и 4—8 ч для жестких бетонных смесей. Применение быстротвердеющих цементов позволяет сокращать продолжительность изотермической выдержки (при более низкой температуре прогрева 70—80°C) и уменьшить общее время пропаривания до 8—10 ч.

Камера непрерывного действия представляет собой горизонтальный тоннель, обеспечивающий установленный режим пропаривания изделий, загружаемых с одной стороны тоннеля и выгружаемых с другой. За время пребывания в камере тоннельного типа изделия проходят зоны подогрева, изотермической выдержки при максимальной температуре и охлаждения. Этим способом пользуются главным образом при конвейерной технологии. В вертикальных камерах непрерывного действия процесс тепло-влажностной обработки изделий осуществляется по принципу противотока. Пар поступает в верхнюю часть камеры, в зону изотермического прогрева по перфорированной трубе. Загрузка изделий производится в нижней части камеры. Затем холодные изделия движутся вверх, навстречу горячей паро-воздушной среде. Пройдя зону изотермического прогрева в наиболее горячей части камеры, изделия опускаются вниз и постепенно охлаждаются. Тепловая обработка в камерах ускоряет время твердения бетона примерно в 7—8 раз.

Тепловлажностная обработка может осуществляться также в автоклавах. В них создаются благоприятные условия при ускорении твердения и образования изделий со структурой высокой прочности. Такими условиями являются давление пара насыщенного, равного 0,8—1,2 МПа, и температура 175—193°C. Режим автоклавной обработки зависит не

только от времени предварительной выдержки изделий до впуска пара в автоклав, давления пара при изотермическом прогреве, интенсивности подъема и снижения давления пара, но и от условий остывания изделия после снижения давления пара до атмосферного. Запаривание в автоклавах — наиболее эффективный метод тепловлажностной обработки, особенно для изделий из ячеистых бетонов.

После тепловлажностной обработки изготовление железобетонных изделий, если не требуется дальнейшая отделка поверхности, заканчивается. Изделие, освобожденное от формы, поступает в отдел технического контроля завода и затем на склад готовой продукции.

9.5.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Производство железобетонных изделий для сборного строительства развивается по двум принципиально различным направлениям: формование в стационарных, неподвижных формах — стендовая и кассетная технологии; формование в перемещаемых формах — поточно-агрегатный способ и на поддонах-вагонетках — конвейерная технология.

Стендовая технология. Стенд представляет собой железобетонную площадку с гладкой поверхностью, разделенную полосами на отдельные технологические участки. На площадке устанавливают опалубки определенной конфигурации, соответствующей форме будущего изделия. Изделие, находясь в стационарной форме в течение всего производственного цикла (до момента затвердевания бетона), остается на месте. В то же время технологическое оборудование для выполнения отдельных операций по укладке арматуры, бетонной смеси и уплотнению перемещается последовательно от одной формы к другой.

Стендовый способ дает высокий экономический эффект при изготовлении железобетонных изделий значительных размеров: плит перекрытий, ферм и балок для промышленного и транспортного строительства.

Особое значение стендовый способ производства приобрел при массовом изготовлении изделий в кассетах (рис. 9.21).

При таком способе производства изделия изготавливают в вертикальных формах-кассетах, представляющих собой ряд отсеков, образованных стальными, прочно укрепленными стенками — перегородками. На кассетной установке осуществляется полностью весь цикл производства тонкостенных изделий, т. е. укладка арматуры, укладка и уплотнение бетонной смеси и твердение. Для этой цели кассетная установка имеет вибрирующие устройства и устройства для парового или электрообогрева изделий в процессе твердения.

Поточно-агрегатный способ производства состоит в том, что все операции по изготовлению изделия, очистке и смазке форм, укладке арматуры и бетонной смеси, твердению и распалубке выполняют на специальных постах, образующих определенную поточную технологическую линию. Изделие вместе с формой последовательно перемещается (с помощью крана или тельфера) от поста к посту с различными интервалами времени, зависящими от продолжительности той или иной операции: от нескольких минут (смазка форм) до нескольких часов (твердение в пропарочных камерах).

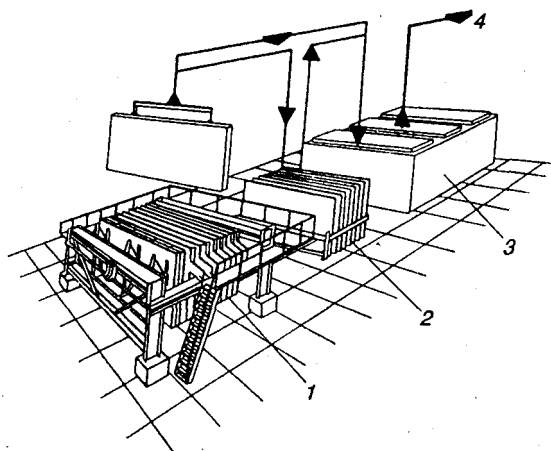


Рис. 9.21. Схема кассетной установки с камерами дозревания:

1 — кассетная установка; 2 — промежуточный склад; 3 — камера дозревания; 4 — выдача на склад готовых изделий

Основное преимущество поточно-агрегатного способа производства заключается в универсальности основного технологического оборудования. Так, например, при

незначительной затрате средств на изготовление новых форм можно быстро переходить на выпуск другого вида изделий. Этот способ производства железобетона получил в нашей стране наибольшее распространение.

Он экономически целесообразен для заводов с широкой номенклатурой изделий и средней годовой производительностью до 100 тыс. м³ (рис. 9.22).

Конвейерный способ производства представляет собой более совершенную поточную технологию и позволяет максимально механизировать и автоматизировать основные операции. Технологическая линия работает по принципу замкнутого пульсирующего конвейера. Изделие перемещается от поста к посту с интервалом времени, необходимым для выполнения наиболее продолжительной операции. Вагонетки-поддоны, на которых собирают форму изделия, с помощью специального толкателя перемещаются по конвейерной линии для производственных операций: очистки и смазки форм, укладки арматуры и бетонной смеси, уплотнения смеси, тепловлажностной обработки и расклубки.

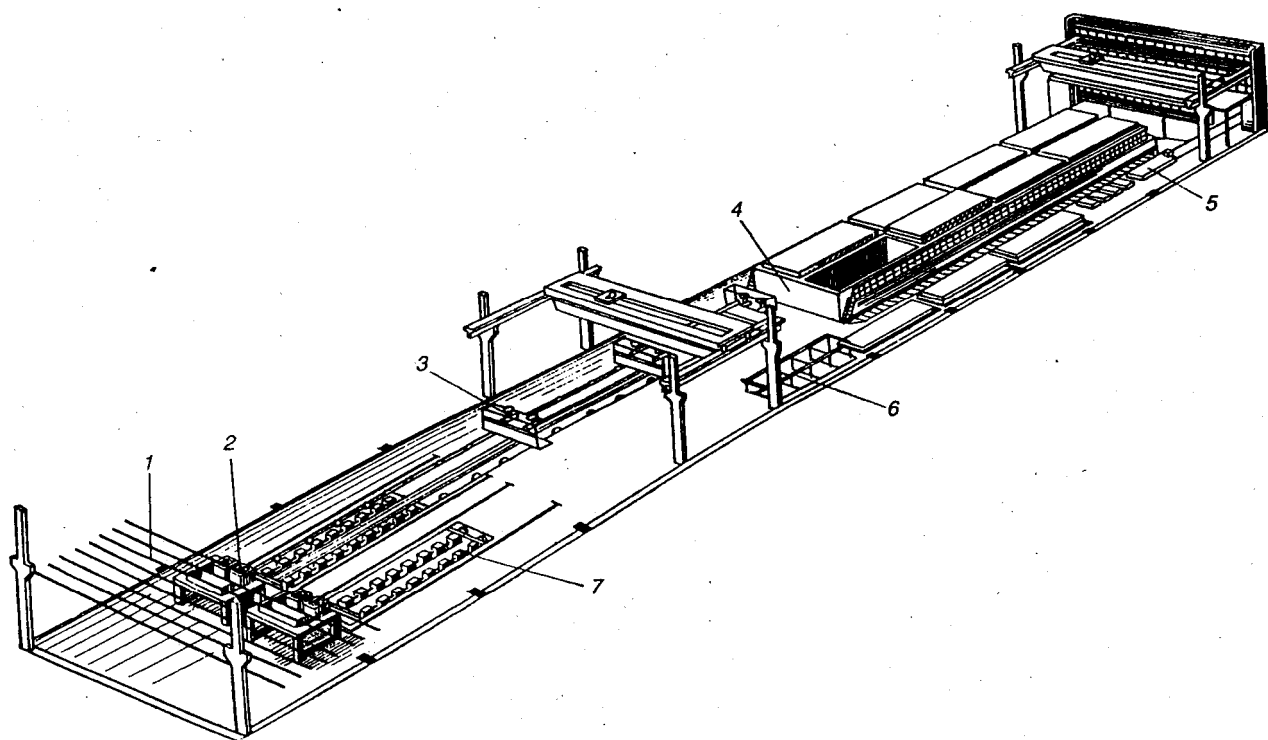


Рис. 9.22. Технологическая линия с двумя формовочными постами производительностью 40 тыс. м³ в год:
1 — эстакада для подачи бетона; 2 — бетоноукладчик; 3 — гидродомкрат; 4 — ямная камера пропаривания; 5 — самоходная тележка; 6 —
стенд контроля; 7 — виброплощадка

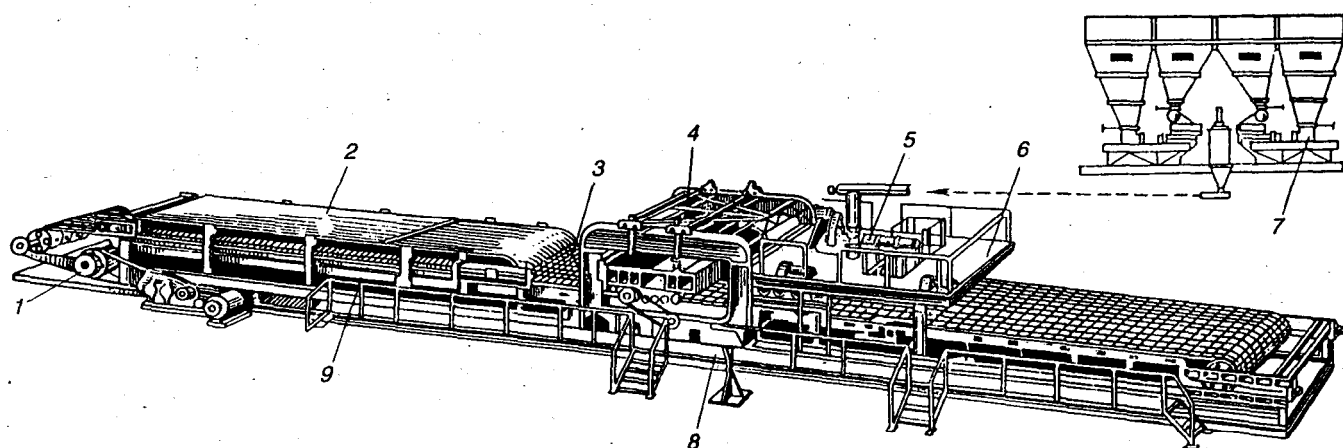


Рис. 9.23. Общий вид прокатного стана:
1 — приводная секция стана; 2 — верхняя непрерывная лента; 3 — формующая лента; 4 — калибровочно-обжимная секция; 5 —
бетономеситель; 6 — приемно-формовочная секция; 7 — дозировочное отделение; 8 — пульт управления; 9 — секция тепловой обработки

Конвейерный способ производства экономически целесообразен при выпуске однотипных изделий на заводах большой мощности. Дальнейшим совершенствованием конвейерной технологии является изготовление железобетонных изделий для сборного строительства на специальных прокатных станах (рис. 9.23).

9.5.5. ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Изготовление монолитных бетонных и железобетонных конструкций экономически целесообразно при использовании индустриальных методов строительного производства и широком применении инвентарной металлической или деревянной опалубки.

Отличительная особенность изготовления монолитного железобетона заключается в том, что основные технологические операции — монтаж опалубки, укладка арматуры и бетонной смеси в опалубку, уплотнение бетонной смеси, твердение отформованных изделий и уход за бетоном — производят на месте строительных работ.

В зависимости от конфигурации бетонируемой конструкции используют различные виды опалубки: стационарную, разборно-переставную, скользящую, перемещаемую в горизонтальном направлении и др.

Арматуру заготавливают в арматурно-сварочных цехах железобетонных заводов и доставляют на место установки в опалубку. Бетонную смесь готовят на механизированных (автоматизированных) бетонных заводах и в виде «товарного бетона» (бетонной смеси) доставляют на место ее укладки. Для большинства монолитных железобетонных изделий и конструкций удобоукладываемость бетонной смеси, характеризуемая осадкой стандартного конуса, находится в пределах от 1—3 см (фундаменты, подпорные стенки, блоки массивов и т. п.) до 6—8 см (конструкции, насыщенные арматурой, тонкие стенки, плиты, колонны малого сечения и др.).

Транспортируют бетонную смесь на место работ автосамосвалами, а при значительных расстояниях — автобетоносмесителями. В автобетоносмесителях готовые бетонные смеси не загрязняются, не расслаиваются и сохраняют однородность, так как могут перемешиваться во время транспортирования. Бетонную смесь часто готовят непосредственно в барабане автобетоносмесителя. Сухие составляющие в заданных количествах загружают в барабан на центральном дозирочном узле бетонного завода и в пути за 5—8 мин до прибытия на место работ готовят бетонную смесь.

На строительной площадке для транспортирования и укладки бетонной смеси используют краны, транспортеры, пневмонасосы и пневмонагнетатели. Пневматический способ подачи бетонной смеси к месту укладки отличается простотой и позволяет транспортировать ее сжатым воздухом по трубам на расстояние до 150 м.

Уплотняют бетонную смесь в опалубке с помощью навесных и переносных поверхностных или глубинных вибраторов.

Монолитные бетонные и железобетонные конструкции бетонируют непрерывно или участками, блоками. Непрерывную укладку бетонной смеси производят в том случае, когда необходимо получить повышенную монолитность и однородность бетона в конструкции или изделии. При бетонировании конструкций большой площади (железобетонные перекрытия) работы ведут участками, предусматривая устройство рабочих швов в местах минимальных напряжений.

Качество бетонируемой конструкции в значительной степени зависит от благоприятных температурно-влажностных условий гидратации цемента и формирования структуры железобетона. Поэтому сразу после укладки и уплотнения бетонной смеси начинают уход за бетоном. В летний период бетонирования поверхность свежеложенной бетонной смеси предохраняют от высыхания, а в первые часы твердения — и от дождя. Для этого открытые горизонтальные поверхности конструкции покрывают слоем влажного песка, опилок или увлажненной тканью грубого переплетения (мешковина). В жаркую погоду предохраняющее покрытие поддерживают во влажном состоянии до приобретения бетоном не менее 70% проектной прочности. Вертикальные поверхности бетонируемой конструкции после снятия опалубки увлажняют водой.

При бетонировании конструкций с большой поверхностью и протяженностью (аэродромные и дорожные бетонные покрытия) для сохранения влаги применяют различные пленкообразующие составы, отражающие лучи солнца. Уложенные бетонные

смеси часто покрывают полимерными пленками (полиэтиленовые, поливинилх-лоридные и др.), которые хорошо сохраняют влагу и предотвращают образование температурно-усадочных деформаций. После достижения бетоном проектной прочности производят распалубку железобетонной конструкции и передачу на нее реально действующей (заданной) нагрузки.

9.5.6. ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ХРАНЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Контроль качества железобетонных изделий включает проверку прочности бетона при сжатии, водонепроницаемости (для бетонных труб) и других характеристик (например, армирования, толщины защитного слоя бетона). Кроме того, проверяют формы и размеры, качество отделки поверхности, а выборочно — трещиностойкость и жесткость изделий, в частности, с привлечением адеструктивных методов контроля.

Железобетонные изделия хранят на складах рассортированными по типоразмерам. При укладке или установке готовых изделий на складах их располагают на деревянных прокладках правильными рядами и в таком положении, в каком они будут работать в сооружении. Так, например, стеновые панели и перегородки — в вертикальном или слегка наклонном положении; настилы перекрытий, двутавровые балки и фермы — в горизонтальном. Исключение составляют колонны, железобетонные сваи и мачты, которые хранят на деревянных подкладках в горизонтальном положении.

9.6. РАЗНОВИДНОСТИ ДРУГИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Широкая номенклатура неорганических вяжущих веществ позволяет расширять и номенклатуру искусственных строительных конгломератов, получаемых на их основе. К наиболее распространенным, кроме бетонов и железобетона, относятся строительные растворы, гипсовые и гипсобетонные камни и изделия, силикатные изделия и асбестоцементные. Все они, естественно, входят в классификацию искусственных строительных конгломератов (см. 1.3.1), подчиняясь общей теории формирования их структур и свойств, общим и объективным ее закономерностям при оптимальных структурах.

Ниже рассмотрены разновидности этих ИСК, их производство и применение в строительстве.

9.6.1. СТРОИТЕЛЬНЫЕ РАСТВОРЫ

Общие сведения.

Строительными растворами называют разновидность ИСК, получаемую при отвердевании рационально подобранной и тщательно перемешанной смеси, состоящей в основном из вяжущего вещества, воды и мелких заполнителей (песка). Отсутствие крупного заполнителя придает строительным растворам некоторые специфические особенности по сравнению с бетонами, например повышенную пластичность.

Строительные растворы применяют для связывания в монолит кирпичной, каменной кладки или крупных изделий, например панелей, блоков при строительстве сборных жилых и промышленных зданий. Растворы используют также при декоративной отделке стен и потолков, для устройства полов, изготовления тонкостенных конструкций, выполнения штукатурных работ.

Основная особенность употребления строительных растворов заключается в том, что их укладывают по пористому основанию — кирпичу, бетону, пористому камню — сравнительно тонкими слоями без специального, как правило, механического уплотнения. Однако при повышенной жесткости растворной смеси нередко используют уплотнение, например вибрационное.

Строительные растворы имеют различное функциональное назначение и по этому признаку их классифицируют на кладочные, штукатурные, монтажные и специальные, к которым относятся акустические, тампонажные, гидроизоляционные, рентгенозащитные и др.

По виду используемых мелкозернистых заполнителей выделяют строительные растворы тяжелые и легкие. Средняя плотность тяжелых — свыше 1500, а легких строительных растворов — менее 1500 кг/м³.

По виду вяжущего вещества строительные растворы различают: цементные, приготовляемые с применением портландцемента или его разновидностей; известковые — на основе извести воздушной или гидравлической; гипсовые — с применением в них строительного или высокопрочного гипса; смешанные, получаемые на основе двух или нескольких вяжущих, чаще всего цемента и извести, реже — цемента и глины. В этих растворах известь и глина, а иногда и некоторые другие тонкодисперсные и тонкомолотые добавки (шлаки, золы и др.) играют роль твердых пластификаторов, поскольку они обладают большой водоудерживающей способностью. Их присутствие предотвращает интенсивный отсос воды из раствора в пористый кирпич, бутовый камень или бетон, при кладке и монтаже сборного объекта.

Для пластификации строительного раствора применяют не только неорганические вещества, особенно известь и гипс, но и органические, в частности, поверхностно-активные вещества. Они снижают расход воды в строительном растворе, улучшают его морозостойкость и т. п. К такого рода добавкам относятся мылонафт, ССБ, СДБ, абиеат натрия, подмыльный щелок (ПМЩ) и др. В зимнее время в растворы добавляют противоморозные вещества (добавки): поташ в количестве 10—15% от массы воды затворения, нитрит натрия — до 5—10%, а также аммиачную воду, нитрат кальция, карбонат натрия и др. Хорошие показатели получаются с добавкой ацетата натрия, при которой кладочные растворы интенсивно набирают прочность при отрицательных температурах до -15°C. Оптимальный расход этой добавки составляет 4% от массы цемента. Она снижает водопотребность, повышает морозостойкость. Противоморозные добавки снижают температуру замерзания жидкой среды растворной смеси, участвуют в процессах гидратации вяжущего вещества.

Заполнителем в растворе служит природный песок обычный (речной, горный и др.) или искусственный пониженной массы — керамзитовый, термозитовый, из вспученного перлита или вермикулита, пемзы или туфа и др. Природные пески по загрязненности по-

сторонними примесями не должны отличаться от песков для цементных бетонов. По гранулометрическому составу песок назначают с наибольшей плотностью с тем, чтобы понизить расход вяжущего вещества. Не допускаются зерна крупнее 10 мм, а количество зерен размером от 5 до 10 мм ограничивается пределом не более 5% по массе. В низкомарочных растворах допускается содержание в песке пылевато-глинистых примесей до 10, реже — до 15—20% при условии обязательного увеличения продолжительности перемешивания раствора при его изготовлении. В качестве ускорителя твердения строительных растворов используют, так же как в бетонах, хлористый кальций.

Для кладочных, облицовочных и штукатурных растворов применяют цементы, получаемые путем совместного помола портланд-цементного клинкера с добавками гипса, кремнеземистых, мрамора, пыли электрофильтров клинкерообжигательных печей и др. Но содержание клинкера в таких цементах должно быть не менее 20%. Допускаются пластифицирующие, гидрофобизирующие, воздухо-вовлекающие добавки. Марки цемента — не менее 200, тонкость помола — через сито № 008 должно проходить не менее 88% взятой навески, водоотделение цементного теста при В/Ц = 1,0 — не более 30% по объему. Цемент должен выдерживать испытание на равномерность изменения объема, содержание SO_3 не должно превышать 1,5—3,5% массы цемента, содержание щелочных оксидов — не более 2% массы цемента.

Для строительных растворов специального назначения — декоративных, кислотостойких, рентгенозащитных, тампонажных и других штукатурок — с особой тщательностью выбирают разновидность вяжущего, добавок и химически стойких заполнителей. Оптимизировать структуру растворов следует с учетом их конкретного назначения, обеспечивая пористость акустических растворов, высокую плотность, кислото- и щелочестойких растворов, гидро-фобность при гидроизоляции и т. д.

Приготовление, свойства и маркировка строительных растворов. Оптимальный состав раствора устанавливают общим методом, но с учетом специфической особенности этого материала — укладывают его на пористое основание кладки, пористую поверхность при оштукатуривании стен и т. п., т. е. требуется предусмотреть увеличение водоудерживающей способности раствора, чтобы предотвратить расслаивание слоя до его отвердевания. Возможны и другие функции строительного раствора — конструктивные, декоративные, водозащитные и т. п., что учитывается на первой стадии проектирования состава.

В редких случаях, при малых объемах работ, составы низкомарочных растворов назначают по таблицам с проверкой их качества в лаборатории и на производстве. Проф. Н.А. Поповым предложен метод подбора состава строительных растворов, основанный на применении формулы: $R_{28} = k \cdot R_{II} (Ц - 0,05) + 4$, где k — коэффициент качества песка.

Технология приготовления строительного раствора на специализированных заводах или отдельных растворных узлах складывается из ряда взаимосвязанных операций: подготовки исходных материалов — просеивания природного песка, домола при необходимости и отсева искусственного песка; дозирования материалов по массе; перемешивания отведенных компонентов до однородного состояния растворной смеси в стационарных или передвижных растворомешалках разной емкости. Продолжительность перемешивания обусловлена видом исходных материалов, но обычно составляет не менее 1,5 мин, а при содержании в смеси высокодисперсных добавок — 3—4 мин. Транспортируют готовую растворную смесь с помощью специально оборудованных автоцистерн и самосвалов.

Сухая смесь соединяется с водой в мешалках со свободным перемешиванием, размещаемых на кузове автомобиля (автосмесителя), в пути следования к объекту строительства.

Перед транспортированием (выборочно) и укладкой готовой растворной смеси определяют ее качественные характеристики, в том числе удобоукладываемость по

пористому основанию, нерасслаиваемость при транспортировании и хранении, условную вязкость и другие заданные свойства.

Удобоукладываемость — это способность растворной смеси равномерно укладываться по пористому основанию (кирпичу, бетону, природному камню и пр.) тонким слоем. Если раствор обладает хорошей удобоукладываемостью, то он способен заполнить все поверхностные неровности основания и образовать сплошность сцепления со всей поверхностью. При недостаточной удобоукладываемости растворная смесь распределяется неравномерно и соприкасается, а затем и сцепляется с основанием только на отдельных участках. Слой становится неодинаковой плотности и толщины. С этим свойством связана характеристика его вязкости, выражаемая обычно в каких-либо условных единицах. От вязкости зависит способность растворной смеси перемещаться (перекачиваться) к месту укладки по трубам, шлангам, лоткам и т. п.

Оценка условной вязкости, или подвижности, растворной смеси производится с помощью стандартного металлического конуса, погружаемого в испытуемый материал (рис. 9.24). Глубина погружения конуса принимается в зависимости от производственного назначения раствора. Так, например, строительные растворы для кирпичной кладки должны характеризоваться глубиной погружения конуса от 9 до 13 см, а для вибрированной кладки из бутового камня — всего 1—3 см. Подвижность их при монтаже стен из крупных элементов должна быть 5—7 см.

Важно не только равномерно и тонким слоем распределить растворную смесь, но предохранить твердеющий слой от быстрого отсасывания воды затворения в поры и капилляры кладки, панели и пр. Для обеспечения длительной водо-удерживающей способности растворной смеси в нее вводят порошкообразные или органические вещества, о которых сообщалось выше. Их количество определяют при проектировании оптимального состава строительного раствора. При этом необходимо сохранить в составе наименьшее количество цемента, тем более что на приготовление растворов расходуется до 15—20% общего количества цемента, применяемого в строительных работах.

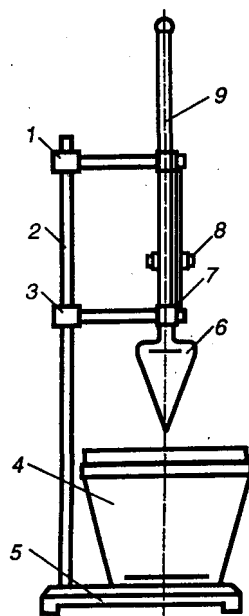


Рис. 9.24. Прибор для определения условной вязкости строительного раствора погружением металлического конуса в испытуемый материал:

1, 3 — кронштейны; 2 — стойка;
4 — сосуд; 5 — основание; 6 —
конус; 7 — шкала; 8 — стрелка;
9 — шкив

Качество отвердевшего строительного раствора в основном характеризуется прочностными, деформативными свойствами и долговечностью. В кирпичной кладке и крупнопанельных зданиях строительные растворы воспринимают напряжения не только от сжимающих усилий, но и вследствие изгиба и среза. В связи с этим раствор в кладке должен обладать необходимой прочностью на растяжение при изгибе и раскалывании. При работе наружных стен из крупноразмерных элементов, подвергающихся механическим и температурно-влажностным воздействиям, важными являются деформативные свойства строительного раствора: усадка, коэффициент температурного линейного расширения, модуль упругости и др. В повышении герметизации стыков, особенно в крупнопанельных зданиях, основную роль играет водонепроницаемость и прочность сцепления раствора с поверхностью бетонных конструкций. Повышение несущей способности кирпичных стен, тем более при низкой марке кладочного раствора, достигается использованием в горизонтальных и вертикальных швах кладки полимерцементного раствора. Периферийная замена обычного кладочного раствора на полимерцементный (на глубину 12 см) в горизонтальных швах кладки повышает несущую способность стен на 40—50%. Наибольший эффект увеличения прочности наблюдается при воздействии растягивающих усилий, что обусловлено высокими адгезионными свойствами полимера. Того же результата достигают усилением отдельных конструктивных элементов кирпичных стен: перемычек, узлов опирания балок перекрытий и др. Значительно снижаются трудозатраты, расход материалов и сокращаются сроки производства работ¹.

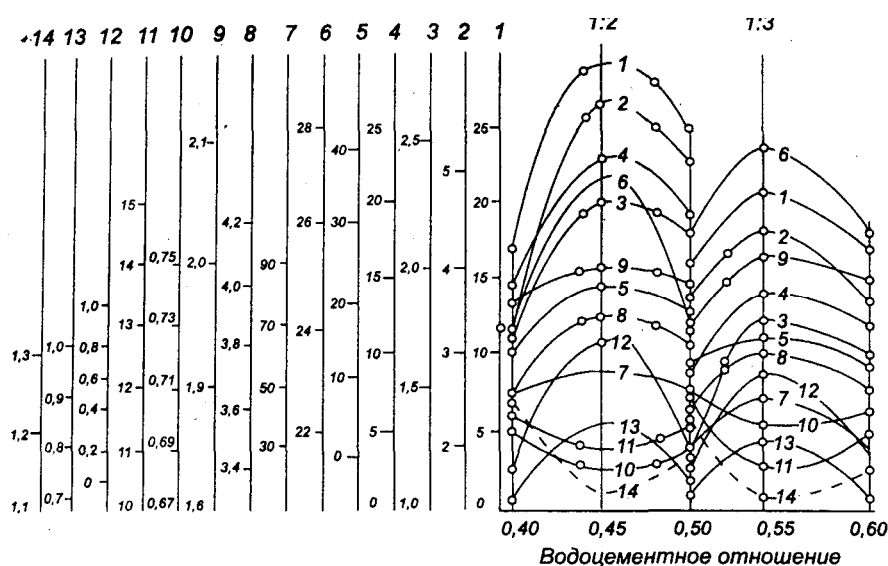


Рис. 9.25. Графическое выражение закона створа для строительных растворов (по данным исследования В.Т. Никулина):

1 — предел прочности при сжатии, МПа; 2 — предел прочности на растяжение при изгибе; 3 — предел прочности на растяжение при раскалывании, МПа; 4 — призмочная прочность, МПа; 5 — упругие относительные деформации, 10^{-5} ; 6 — мгновенный модуль упругости, 10^{-3} ; 7 — морозостойкость, количество циклов; 8 — скорость ультразвука, км/с; 9 — объемная масса, г/см³; 10 — коэффициент выхода растворной смеси; 11 — водопоглощаемость по массе, %; 12 — водопроницаемость, МПа; 13 — коэффициент призмочной прочности; 14 — полные приведенные затраты на 100 м³ раствора, тыс. руб.

Обеспечение длительной нормальной эксплуатации зданий связано с долговечностью кладочного строительного раствора, т. е. с его способностью сохранять или даже упрочнять структуру в эксплуатационный период. Условно ее можно определять испытанием образцов на морозостойкость и стойкость при увлажнении и высушивании. При более обстоятельных испытаниях определяют также плотность, пористость,

¹ Анурозтвили Ш., Муродян З. Как повысить несущую способность стен // Стройка. 2000. 1. С. 131—132.

водопоглощаемость, водонепроницаемость раствора, взаимосвязь этих свойств в соответствии с законом створа (рис. 9.25).

На первой стадии проектирования оптимального состава важно выбрать наилучший для данных условий вяжущий компонент, способный удерживать воду в тонких слоях, высококачественный песок и, при необходимости, пластифицирующую добавку. Контроль качества раствора осуществляется путем систематической проверки качества применяемых материалов, а также точности дозирования, тщательности перемешивания смеси, удобоукладываемости получаемой растворной смеси и прочности раствора.

Строительные растворы имеют следующие показатели по пределу прочности при сжатии — марки 4,10,25,50,75,100,150,200. Для конструкционных целей принимают и более высокие марки растворов — 300 и выше. Такой высокопрочный раствор используют также для заполнения каналов в предварительно напряженных конструкциях, уплотнения бетонных сооружений методом инъекции (инъекционные растворы). В них применяют портландцемент марок 400, 500. Марку строительного раствора устанавливают с помощью испытания образцов-кубов с размером стороны 7,07 см из смеси рабочей консистенции, отвердевающих на пористом или плотном основании при температуре 15—20°C и испытываемых в возрасте 28 суток.

Вышеуказанные низкомарочные растворы изготавливают на основе извести, гипса или местных вяжущих веществ; используют для кладки малоэтажных зданий, штукатурных работ и др. Растворы повышенных марок применяют при кладке наружных стен зданий более высокой этажности, устройства перемычек, карнизов, монтажа сборных стен из панелей и т. п.

9.6.2. СУХИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СМЕСИ

В последние годы рынок материалов в нашей стране и особенно за рубежом расширился за счет массового внедрения в строительство разнообразных сухих строительных смесей. Главное их назначение — отделочные, а также монтажные работы внутри зданий и снаружи (кладка стен, отделка фасадов, устройство наливных полов). Среди сухих смесей — цементно-известковые, используемые при положительных и небольших отрицательных температурах (с противоморозными добавками), гипсовые сухие штукатурные смеси для реставрации панельных домов, монолитного домостроения и др. Расход гипсовой сухой смеси составляет примерно до 80 м²/т. Практикуется также комбинированное применение различных сухих смесей, клеев для укладки настенной и напольной кафельной плитки, разные виды шпаклевок. Широкий ассортимент сухих клеевых смесей выпускает, в частности Подольский опытный цементный завод. Предложены также другие технологии сухих смесей мини-заводов, например МЗС-10 (рис. 9.26) и др.¹

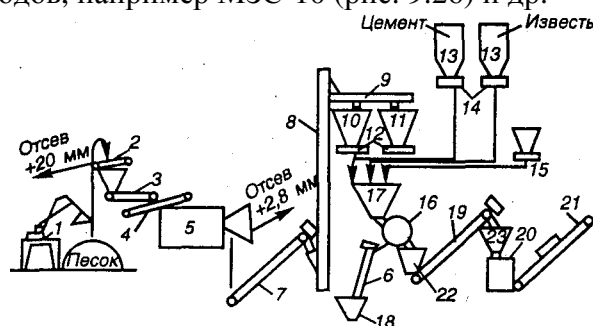


Рис. 9.26. Технологическая схема мини-завода сухих смесей МЗС-10:

1 — грейферный погрузчик; 2 — виброгрохот; 3 — питатель шнековый; 4 — ленточный конвейер; 5 — барабанное сушило с грохотом; 6, 7, 19 — вертикальные шнеки; 8 — элеватор; 9 — вибросито; 10 — бункер мелкого песка (0—1,4 мм); 11 — бункер крупного песка (1,4—2,8 мм); 12, 14 — винтовые питатели; 13 — склад вяжущего (цемент, известь); 15 — дозатор пластифицирующих добавок; 16 — дозатор противоморозных добавок; 17 — дозатор; 18 — смеситель; 20 — затарочная машина; 21 — ленточный конвейер; 22 — емкость готовой смеси; 23 — бункер готовой смеси

Сухие смеси, например отечественные «Плитонит», имеют высокую адгезию и большую пластичность, нестекаемость с вертикальных стен, морозостойкость. В них используют цемент Пикалевского завода марок М-400 и М-500, кварцевый песок с фракциями до 0,6 мм и повышенной однородностью и стабильностью состава, органические добавки Waken и Dow, которыми широко пользуются зарубежные фирмы в своих составах сухих смесей. Из зарубежных шпаклевочных смесей у нас используют французские (фирмы «Семин»), финские (фирмы «Лохья»). Сухие смеси при их правильном выборе и применении ускоряют строительные работы на производстве и обеспечивают высокое их качество.

¹ Денисов Г. Отечественный мини-завод сухих смесей // Стройка. 2000. 32.

9.6.3. ГИПСОВЫЕ И ГИПСОБЕТОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Изделия, получаемые на основе гипсового вяжущего вещества, разделяют на гипсовые и гипсобетонные. Гипсовые изделия изготавливают из гипсового теста, иногда с минеральными или органическими добавками для улучшения технических свойств готовой продукции, гипсобетонные — из смеси с применением мелкозернистых (песчаных) и крупных неорганических пористых заполнителей: минеральных — шлака, ракушечника, туфового и пемзового заполнителей и других, или органических — древесных опилок, древесной шерсти, камыша и т. п.

Гипсовые и гипсобетонные изделия могут быть сплошные и пустотелые (объем пустот более 15%), армированные и неармированные. По назначению их разделяют на панели и плиты перегородочные; листы обшивочные (гипсовая сухая штукатурка); камни стеновые; изделия перекрытий; теплоизоляционные материалы; архитектурно-декоративные детали. Изготовление гипсовых и гипсобетонных изделий предусматривает все операции, присущие технологии ИСК, а именно: подготовку и дозирование составляющих материалов, приготовление гипсового теста или гипсобетонной смеси, формование изделий, освобождение их от форм и сушка с отвердеванием.

Бетоны на основе строительного гипса, благодаря ценным свойствам вяжущего вещества (быстрое твердение в обычных условиях и способность легко формоваться), относятся к весьма перспективным при изготовлении крупноразмерных элементов для сборного строительства. Они имеют низкую тепло- и звукопроводность (при относительно малой средней плотности), достаточную прочность, легко поддаются механической обработке и окрашиваются в различные цвета. Изделия, получаемые на основе гипсовых вяжущих веществ, имеют среднюю плотность 800—1100 кг/м³ (гипсовые) и 1200—1500 кг/м³ (гипсобетонные), а предел прочности при сжатии до 10 МПа. Прочность гипсовых и гипсобетонных изделий зависит от активности гипсового вяжущего вещества α - или β -модификаций, водогипсового отношения, качества и количества заполнителей. При оптимальной структуре она может быть определена на разные виды напряжений по общим формулам прочности ИСК. Для снижения расхода вяжущего вещества и средней плотности изделий иногда при подготовке гипсового теста его смешивают с технической пеной или добавляют газообразующие вещества. В этих случаях получают пеногипсовые или газогипсовые изделия со средней плотностью до 800 кг/м³. К недостаткам изделий из гипса и гипсобетона следует отнести низкую водостойкость, гигроскопичность, хрупкость и малую прочность при изгибе. Такие изделия и конструкции нельзя применять в помещениях с влажностью воздуха более 60%. Существенного повышения водостойкости достигают путем использования гипсоцементно-пуццоланового вяжущего вещества (ГЦПВ).

Ниже рассмотрены основные разновидности продукции на основе гипсовых вяжущих веществ.

Гипсобетонные панели широко используют в строительстве для устройства перегородок, санитарно-технических кабин, оснований под полы и других деталей. Панели для самонесущих перегородок изготавливают из гипсобетона с пределом прочности при сжатии не менее 3,5 МПа и средней плотностью до 1400 кг/м³. Влажность гипсобетонных панелей при доставке потребителю не должна превышать 8—12%. В связи с этим технико-экономические показатели производства панелей в кассетах ниже по сравнению с изготовлением их способом непрерывного проката.

Гипсобетонные панели, армированные деревянной реечной арматурой, широко применяют для устройства ненесущих перегородок в жилых, общественных зданиях, а также в бытовых помещениях промышленных зданий. Они могут быть сплошными или с проемами для дверей и размерами «на комнату». Размер панелей перегородок по ширине обычно равен высоте этажа, а по длине соответствует длине или части длины комнаты

(3х6 м) при толщине панели 60—120 мм. Готовые панели должны иметь гладкую поверхность, пригодную для окраски или оклейки обоями.

Гипсобетонные панели для устройства санитарно-технических кабин и вентиляционных коммуникаций жилых и промышленных зданий изготовляют из гипсобетона с пределом прочности при сжатии 6,0—7,0 МПа в высушенном до постоянной массы состоянии. Кроме того, подобные панели могут быть использованы для устройства пола под линолеум, мастичные полы, поливинилхлоридные плитки и др. Панели, изготовленные на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (0—70% полуводного гипса, 15—20% портландцемента и 10—25% активному минеральной добавки), выпускают толщиной не менее 50 мм и армируют деревянными каркасами. Они должны иметь предел прочности при сжатии не менее 7,0 МПа, а среднюю плотность — до 1300 кг/м³ (при влажности 10%). Применение гипсобетонных панелей в строительстве позволяет ускорить отделочные работы и снизить себестоимость устройства перегородок.

Эффективными являются *гипсоволокнистые панели* с применением в них волокнистых заполнителей в виде бумажной макулатуры, камыша, отходов текстильного производства, сечки соломы.

Экономически целесообразный метод производства панелей — изготовление их на прокатных станах с армированием деревянным реечным каркасом.

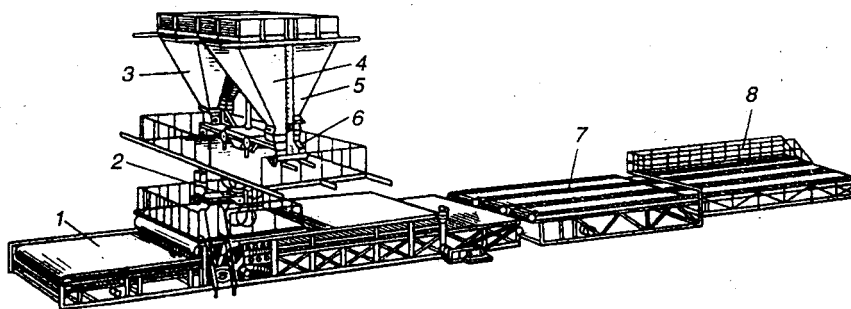


Рис. 9.27. Технологическая схема производства гипсобетонных панелей методом проката:

1 — прокатный агрегат; 2 — растворомешалка; 3, 4, 5, — бункера соответственно гипса, песка, опилок; 6 — дозатор-питатель; 7 — обгонный рольганг; 8 — кантователь

Шнековый укладчик прокатного стана подает на ранее уложенный каркас гипсобетонную массу и распределяет ее ровным слоем по ширине панели (рис. 9.27). Разровненная гипсобетонная масса проходит между двумя резиновыми лентами, движущимися с одинаковой скоростью в одном направлении, и уплотняется калибрующими валками. Калибрующие валки, придающие панели окончательные размеры по толщине, не соприкасаются с уплотняемой массой, так как отделяются от нее движущимися резиновыми лентами. Отформованная панель поступает на обгонный рольганг 7 и за короткий промежуток времени отвердевает.

Далее рольгангом панель подается на кантователь 8, ставится в вертикальное положение и направляется в сушильную камеру. Панели сушат в течение 20—26 ч горячими газами при температуре теплоносителя 110—130°C и после просушивания (до влажности 12%) транспортируют на строительную площадку или склад готовой продукции.

Гипсобетонные панели могут изготавливаться также в вертикальных формах-кассетах. Соответствующие установки позволяют осуществлять те же производственные операции, что и при изготовлении панелей на прокатных станах. Однако продолжительность цикла изготовления панели в кассетах составляет около 1 ч, а при непрерывном прокате — всего лишь 15—20 мин.

Гипсобетонные плиты изготовляют из гипсового теста или растворных и гипсобетонных смесей. Они могут быть сплошными и пустотелыми, размером 0,8х0,4 м при толщине 80—100 мм. Производство плит состоит из подготовки гипсовой массы, формования и высушивания изделия. Формование плит производят: 1) методом литья гипсового теста,

содержащего до 55—75% воды, в формы и уплотнения изделия вибрацией; 2) методом прессования, при котором строительный гипс незначительно увлажняют водой и после заполнения им формы изделие прессуют. В этом случае достигается высокая прочность изделий и отпадает необходимость в сушке. Влажность изделий не должна быть более 8% при средней плотности 1000—1400 кг/м³.

Гипсобетонные плиты применяют для устройства перегородок и в качестве огнезащитной облицовки деревянных конструкций.

Листы гипсокартонные (сухая гипсовая штукатурка) представляют собой отделочный материал, состоящий из тонкого слоя затвердевшего гипсового теста с некоторым количеством в нем наполнителя и технической пены, оклеенного картоном. Картон как бы армирует гипсовое тесто (сердечник), повышает прочность изделия и позволяет вести отделку стены без особой подготовки. Пена уменьшает среднюю плотность гипсового сердечника до 900 кг/м³ и ниже.

При изготовлении сухой гипсовой штукатурки используют также различные добавки, которые вводят с целью регулирования сроков схватывания гипса, получения пористой структуры и лучшего сцепления гипсовой массы с картоном.

Гипсовые облицовочные листы изготавливают на прокатных конвейерных установках по следующей технологической схеме. Предварительно приготовленное гипсовое тесто поступает в мешалку и перемешивается с устойчивой технической пеной.

Полученный пеногипс выливают на лист картона, движущийся вместе с резиновой лентой конвейера, и покрывают сверху другим листом. После этого гипсовая масса, покрытая картоном, протягивается между формующими валиками, отстоящими друг от друга на расстоянии, равном толщине сухой штукатурки. Пройдя между формующими валиками, гипсокартонная лента вместе с конвейером продолжает двигаться к обрезающему устройству и во время движения отвердевает. После отвердевания она разрезается на листы требуемой длины, которые затем поступают в многоярусные сушила. Просушенные облицовочные листы отправляют на склад готовой продукции.

Листы сухой гипсовой штукатурки выпускают длиной от 2,5 до 3,5 м, т. е. на всю высоту этажа облицовываемого помещения, шириной 1,2 и 1,3 м и толщиной 10 и 12 мм.

В настоящее время изготавливают также гипсоволокнистую сухую штукатурку, т. е. бескартонные гипсоволокнистые листы. Такие листы получают из гипсовой массы с органическими волокнистыми наполнителями, бумажной макулатурой, льняной кострой, измельченной древесиной и др. В состав гипсоволокнистых листов входит 90—95% строительного гипса, 5—10% волокнистых армирующих материалов и вода для образования гипсоволокнистой массы.

Гипсоволокнистые облицовочные листы по прочности не уступают сухой гипсовой штукатурке при значительно меньшей их себестоимости.

К облицовочным гипсовым листам предъявляются следующие технические требования. Предел прочности при изгибе должен быть не менее 3,2 МПа при толщине образца 12 мм и 2,7 МПа при толщине 10 мм. Влажность плит не должна превышать 1—2% по массе.

Гипсовые облицовочные листы применяют для обшивки внутренних стен перегородок и потолков промышленных и гражданских зданий с относительной влажностью воздуха не более 60%. Их крепят к облицовываемой поверхности специальными мастиками, приготовленными на битумной, казеиновой или гипсовой основах.

Гипсобетонные камни для наружных стен изготавливают сплошными и пустотелыми. Такие камни могут быть использованы для кладки стен неответственных зданий. По пределу прочности при сжатии в высушенном состоянии гипсобетонные камни делят на марки 35, 50 и 75 (3,5—7,5 МПа).

Могут изготавливаться также на производстве гипсобетонные изделия для перекрытий: самонесущие плиты и несущие гипсобетонные камни. Эти изделия выпускают как сплошными, так и пустотелыми, армированными и неармированными, с каркасом и без каркаса. Гипсобетонные изделия применяют в качестве вкладышей и для заполнения

часторебристых панелей перекрытий в жилых и подсобных зданиях и неответственных сооружениях.

9.7. СИЛИКАТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

9.7.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Силикатные материалы и изделия автоклавного твердения представляют собой искусственные строительные конгломераты на основе известково-кремнеземистого (силикатного) камня, синтезируемого в процессе автоклавной обработки под действием пара при высокой температуре и повышенном давлении. Одним из основных компонентов сырьевой смеси, из которой формуется изделие, служит известь, которая обладает большой химической активностью к кремнезему при термовлажностной обработке. Именно поэтому вторым основным компонентом сырьевой смеси является кварцевый песок или другие минеральные вещества, содержащие кремнезем, например шлаки, золы ТЭЦ и др. Чтобы химическое взаимодействие проходило достаточно интенсивно, кремнеземистый компонент подвергают тонкому измельчению. Чем более тонким будет измельченный песок, тем выше должно быть относительное содержание извести в смеси. В качестве других компонентов могут быть также введены заполнители в виде немолотого кварцевого песка, шлака, керамзита, вспученного перлита и т. п. Непременным компонентом во всех смесях выступает вода.

К числу автоклавных силикатных изделий относят силикатный кирпич, крупные силикатные блоки, плиты из тяжелого силикатного бетона, панели перекрытий и стеновые, колонны, балки и пр. Легкие заполнители позволяют понизить массу стеновых панелей и других элементов. Силикатные изделия выпускают полнотелыми или облегченными со сквозными или полужамкнутыми пустотами. Особое значение имеют силикатные ячеистые бетоны, заполненные равномерно распределенными воздушными ячейками, или пузырьками. Они могут иметь конструктивное и теплоизоляционное назначение, что обуславливает форму и размеры изделий, их качественные показатели.

Изделия приобретают свойства, необходимые для строительных материалов, после автоклавной обработки, в процессе которой образуется новый известково-кремнеземистый цемент с характерными для него новообразованиями гидросиликатов кальция и магния, а также безводных силикатов.

Возможность образования в автоклаве камневидного изделия была установлена в конце XIX в., но массовое производство силикатных изделий, деталей и конструкций, особенно типа бетонов, было впервые организовано в нашей стране. Технология их изготовления механизирована и в значительной мере автоматизирована, что обеспечивает получение более дешевой продукции по сравнению с цементными материалами и изделиями. Эффективные исследования в этом направлении были выполнены П.И. Боженым, А.В. Волженским, П.П. Будниковым, Ю.М. Буттом и др. Было показано, что при автоклавной обработке образуются наиболее устойчивые низкоосновные гидросиликаты с соотношением $\text{CaO}:\text{SiO}_2$ в пределах 0,8—1,2, хотя на промежуточных стадиях отвердевания возможны и более высокоосновные химические соединения. П.И. Божен, отмечая «технический синтез» цементирующей связки в автоклавном конгломерате, состоящей из смеси гидросиликатов, полагает, что химическое сырье должно удовлетворять определенным требованиям. Оно должно быть высокодисперсным с удельной поверхностью порошка в пределах 2000—4000 $\text{см}^2/\text{г}$, по возможности аморфным, стеклообразным. Химически активное сырье обеспечивает не только образование цементирующей связки в автоклавном конгломерате, но и ряд технологических свойств сырьевой смеси (формуемость изделий, ровность их поверхности, транспортабельность и др.). Но не только химические и физико-химические процессы влияют на формирование структуры и свойств силикатных материалов при автоклавной обработке. А.В. Волженский первым обратил внимание на изменение тепловлажностных условий при автоклавной обработке и их влияние на качество изделий. В связи с этим было принято выделить три этапа в автоклавной обработке: наполнение

автоклава и изделий паром до заданного максимального давления; спуск пара; извлечение изделий из автоклава.

Полный цикл автоклавной обработки, по данным П.И. Божено-ва, складывается из пяти этапов: впуск пара и установление температуры 100°C ; дальнейшее повышение температуры среды и давления пара до назначенного максимума; изотермическая выдержка при постоянном давлении (чем выше давление, тем короче режим автоклавизации); медленное и постепенное нарастание скорости снижения давления пара до атмосферного, а температуры — до 100°C ; окончательное остывание изделий в автоклаве или после выгрузки их из автоклава. Оптимальный режим, т. е. наилучшие условия по величине давления пара, температуры и продолжительности всех стадий обработки, обуславливается видом сырья, хотя по экономическим соображениям всегда стремятся к быстрому подъему и медленному спуску давления.

Формирование микро- и макроструктуры силикатного изделия в автоклаве происходит на различных стадиях обработки. Механизм отвердевания известково-песчаного сырца до камневидного состояния выражается в том, что вначале образуется известково-кремнеземистое цементирующее вещество как продукт химического взаимодействия основных компонентов в смеси в условиях повышенных давлений и температур. Согласно одной из теорий (П.П. Будникова, Ю.М. Бутта и др.), образование цементирующего вещества происходит через предварительное растворение извести в воде. Так как растворимость извести с повышением температуры понижается, то постепенно раствор становится насыщенным. Но с повышением температуры возрастает растворимость тонкодисперсного кремнезема. Так, например, с повышением температуры с 80 до 120°C растворимость кремнезема возрастает (по данным Кеннеди) почти в 3 раза. Поэтому при температуре $120\text{—}130^{\circ}\text{C}$ известь и кремнезем, находясь в растворе, взаимодействуют с образованием гелеобразных гидросиликатов кальция. По мере дальнейшего повышения температуры новообразования укрупняются с возникновением зародышей и кристаллической фазы, а затем и кристаллических сростков. При избытке извести возникают сравнительно крупнокристаллические двусосновные гидросиликаты кальция типа $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ и Ca_3SH_2 , а после полного связывания извести и в процессе перекристаллизации возникают более устойчивые микрокристаллические низкоосновные гидросиликаты кальция типа $\text{CSH}(\text{B})$ и $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$ (тоберморит). Кристаллизация происходит вокруг зерен кварца и в межзерновом пространстве; сопровождается срастанием кристаллических новообразований в каркас с дальнейшим его упрочнением и обрастанием.

Согласно другой теории, образование микроструктуры вяжущего происходит не через растворение извести и кремнезема, а в твердой фазе под влиянием процесса самодиффузии молекул в условиях водной среды и повышенной температуры. Имеется и третья теория (А.В. Саталкин, П.Г. Комохов и др.), допускающая образование микроструктуры вяжущего в результате реакций в жидкой и твердой фазах.

Большую пользу в формировании структуры и свойств силикатных камня и материалов оказывают вводимые в смеси добавочные вещества (добавки), выполняющие функции ускорителей процессов образования гидросиликатов кальция или магния, кристаллизации новообразований, модификаторов свойств и структуры. В целом в составе силикатного камня преобладают низкоосновные гидросиликаты кальция, имеющие тонкоигольчатое или чешуйчатое микрокристаллическое строение $\text{CSH}(\text{B})$ и тоберморит $\text{C}_5\text{S}_6\text{H}_5$. В высокоизвестковых смесях в результате синтеза образуется гиллебрандит $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ (т. е. C_2SH).

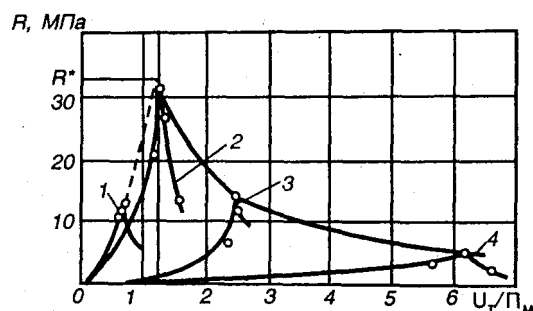


Рис. 9.28. Зависимость прочности силикатного камня от соотношения масс известкового теста (I_T) и молотого песка (P_M), а также от состава смеси:
1 — 20:80; 2 — 40:60; 3 — 60:40; 4 — 80:20. В числителе количество извести, в знаменателе — количество молотого песка (помола), взятых по массе

Оптимальная структура силикатного материала формируется при определенном количестве известково-кремнеземе-стого цемента и минимальном соотношении его фазовых составляющих. В свежесделанном конгломерате дисперсионной средой (с) служит известковое тесто (I_T), а в качестве твердой дисперсной фазы (ф) выступает молотый кремнеземистый (песчаный) компонент (P_M). Активность (прочность) известково-кремнеземистого вяжущего вещества оптимальной структуры после автоклавной обработки, как и другие свойства силикатного материала, зависят от величины соотношения $I_T : P_M$ (по массе). Результаты экспериментальных исследований показали, что пределы прочности при сжатии, на растяжение при изгибе, средняя плотность и другие показатели свойств силикатного камня принимают экстремальные значения при некотором минимальном соотношении $c^*/\phi = I_T^*/P_M$ (рис. 9.28). В полном соответствии с формулой (3.4) прочность силикатного конгломерата $R_c = R^*/x$, где R^* — прочность автоклавного силикатного камня оптимальной структуры; $x = I_T/P_M : I_T^*/P_M = \delta/\delta^*$ — отношение усредненных толщин пленок известкового теста соответственно в вяжущем веществе конгломерата и в вяжущем веществе оптимальной структуры; n — показатель степени, зависит от качества исходных материалов.

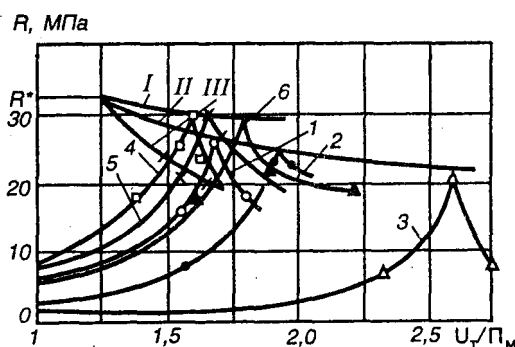


Рис. 9.29. Зависимость прочности мелкозернистого силикатного бетона от соотношения масс известково-кремнеземистого вяжущего и песка:
1 — 80:20; 2 — 60:40; 3 — 40:60; 4 — 30:70; 5 — 20:80; 6 — 17:83. Составы изготовлялись: 1, 2, 3 — с применением керамдора; 4, 5, 6 — с применением гранитного щебня. Кривые оптимальных структур I, II и III относятся к бетону соответственно с применением гранитного щебня, керамдора и только местного карьерного песка

Выполненные исследования силикатного камня и силикатного конгломерата на примерах бетонов мелко- и крупнозернистых (рис. 9.29) показали, что при оптимальных структурах их свойства полностью подчиняются общим закономерностям ИСК.

Кроме кремнеземистого сырьевого материала, можно использовать в производстве автоклавных изделий распространенные малокварцевые виды сырья — полевошпатовые, глинистые, карбонатные пески, а также шлаки и другие побочные продукты

промышленности. Минералы малокварцевого сырья, растворившись в условиях автоклавирования, становятся активными компонентами, не уступающими по растворимости кварцу. Их активность зависит от размеров радиусов анионов и катионов, входящих в их состав. В автоклаве формируется новое вяжущее (безобжиговое солешлаковое вяжущее), по свойствам превосходящее известково-кремнеземистое автоклавное твердение. Оно состоит из низкоосновных слабозакристаллизованных гидросиликатов кальция, а в присутствии ионов алюминия — из высокоосновных гидросиликатов кальция.

9.7.2. СИЛИКАТНЫЙ (ИЗВЕСТКОВО-ПЕСЧАНЫЙ) КИРПИЧ

Силикатный кирпич — искусственный камневидный материал, получаемый путем прессования увлажненной смеси кварцевого песка и извести с последующим запариванием в автоклаве. Сырьем для его производства служат кварцевый песок (92—94% от массы сухой смеси) и известь (6—8%), считая на активную CaO . Перед прессованием в изделия известково-песчаную смесь увлажняют до 7—9% по массе.

Кварцевые пески, применяемые в производстве кирпича, должны состоять из зерен различной крупности для уменьшения объема пустот, иметь примесей слюды не более 0,5% и быть без включений глины, снижающих качество изделий.

Известь может быть негашеной или гидратной с содержанием не более 5% MgO . Наличие в извести пережога затрудняет гашение ее и может способствовать растрескиванию кирпича. Обычно используют быстрогасящуюся известь с содержанием около 70% активной CaO .

Изготовление силикатного кирпича включает следующие операции: измельчение известки-кипелки, смешение извести с песком, гашение извести в смеси с песком, дополнительное перемешивание и увлажнение смеси до 7—9%, формование (прессование) кирпича и обработка сырца-кирпича в автоклавах. Основными операциями являются формование и запаривание сырца. Формование кирпича производится на рычажных прессах под давлением 15,0—20,0 МПа. Отформованный кирпич-сырец укладывается на вагонетки и подается для запаривания в автоклав.

Запаривание сырца в автоклаве (по П.И. Боженову) условно состоит из пяти этапов: 1) от начала пуска пара до установления в автоклаве температуры 100°C; 2) от начала подъема давления пара до установления максимально заданного; 3) выдержка изделия при постоянной температуре и давлении; 4) с момента снижения давления и температуры до 100°C; 5) остывание изделий до температуры 18—20°C (возможно добавление вакуумирования). Для высококачественной автоклавной обработки сырца задают определенный режим: постепенный подъем давления пара в течение 1,5—2,0 ч, изотермическая выдержка при температуре 175—190°C в течение 4—8 ч, снижение давления пара и температуры в течение 2—4 ч. Весь цикл запаривания длится 10—14 ч. Выгруженный из автоклава кирпич выдерживают 10—15 дней на воздухе для карбонизации непрореагировавшей извести углекислым газом. Карбонизация извести способствует повышению плотности, прочности и водостойкости силикатного кирпича.

Силикатный кирпич имеет такую же форму и те же размеры, как и обыкновенный глиняный, — 250x120x65 мм. Его изготавливают как сплошным, так и пустотелым. Выпускают также крупноразмерный кирпич (250x120x88 мм) с пустотами. В зависимости от предела прочности при сжатии и изгибе силикатный кирпич делят на марки 75, 100, 125, 200 и 250. Средняя плотность силикатного кирпича несколько выше, нежели у обычного глиняного, и составляет до 1800—1900 кг/м³, теплопроводность находится в пределах 0,81—0,87 Вт/(м·К). По теплотехническим показателям силикатный кирпич подразделяют на эффективный с плотностью не более 1400 кг/м³ и теплопроводностью до 0,46 Вт/(м·К), условно эффективный соответственно 1401—1650 кг/м³ и до 0,58 Вт/(м·К) и обыкновенный с плотностью свыше 1650 кг/м³ и теплопроводностью до 0,7 Вт/(м·К). Водопоглощение кирпича должно быть не более 16% по массе, а морозостойкость — обусловлена марками: F50, 35, 25 и 15. По назначению этот кирпич именуют рядовым и лицевым. Лицевой может быть неокрашенным и цветным: голубого, зеленоватого, желтого и других цветов.

Себестоимость силикатного кирпича примерно на 25—35% ниже глиняного, так как в два раза меньше расход топлива, в три раза — электроэнергии, ниже трудоемкость производства. Он широко применяется для кладки несущих стен жилых, промышленных и гражданских зданий, для столбов, опор и т. д. Однако по сравнению с обычным глиняным кирпичом силикатный имеет пониженную стойкость против воздействия некоторых

агрессивных сред. Такой кирпич не следует использовать для кладки фундаментов, особенно в условиях высокого уровня грунтовых вод. Нельзя применять силикатный кирпич в изделиях и конструкциях, подверженных длительному воздействию температур свыше 500°C (печи, дымовые трубы и т. п.). При длительном нагреве силикатный кирпич разрушается вследствие дегидратации гидросиликата и гидрооксида кальция.

9.7.3. ИЗВЕСТКОВО-ШЛАКОВЫЙ И ИЗВЕСТКОВО-ЗОЛЬНЫЙ КИРПИЧ

Известково-шлаковый и известково-зольный кирпич — стеновые каменные материалы, отличающиеся от силикатного несколько меньшей средней плотностью и теплопроводностью. В состав известково-шлакового кирпича входят гранулированный доменный шлак (88—97%), известь (3—12%) и вода, а в состав известково-зольного — зола (75—80%), известь (20—25%) и вода.

По пределу прочности при сжатии известково-шлаковый и известково-зольный кирпич делят на три марки: 25, 50, 75. Средняя плотность этих каменных материалов 1400—1600 кг/м³, а теплопроводность 0,6—0,7 Вт/(м·К).

Использование шлака и золы для изготовления стеновых материалов позволяет расширить сырьевую базу и снизить себестоимость производства силикатных строительных материалов.

Известково-шлаковый и известково-зольный кирпич применяют главным образом для кладки стен зданий высотой не более трех этажей или для кладки верхних этажей многоэтажных гражданских и промышленных зданий.

9.7.4. СИЛИКАТНЫЕ БЕТОНЫ

Силикатный бетон — камневидный искусственный строительный конгломерат, получающийся из уплотненной и отвердевшей в автоклаве увлажненной смеси молотой негашеной извести (6—10%), молотого кварцевого песка (8—15%) и обычного кварцевого песка (70—80%) или другого заполнителя. Силикатные бетоны могут быть тяжелыми — со средней плотностью более 1800 кг/м^3 (в них плотные заполнители — песок и щебень или гравий), легкими — со средней плотностью менее 1800 кг/м^3 (в них заполнители — керамзит, аглопорит и др.) и ячеистыми — со средней плотностью менее 500 кг/м^3 . Разделяют бетоны мелкозернистые с крупностью зерен заполнителя до 5 мм и крупнозернистые с зернами более 5 мм.

Наибольшее применение получили тяжелые мелкозернистые бетоны с пределом прочности при сжатии 15, 20, 25, 30, 40 и 50 МПа. Можно изготовить высокопрочные силикатные бетоны с более высоким пределом прочности — 60, 70, 80 МПа и более. Морозостойкость таких бетонов, особенно бетонов высокой прочности, достигает 300 циклов попеременного замораживания и оттаивания без заметных следов разрушений структуры. Кроме того, они обладают достаточной водостойкостью и стойкостью к воздействию некоторых агрессивных сред. Прочность, морозостойкость и другие свойства силикатных бетонов в значительной степени зависят от тонкости помола песка и содержания его в смеси при определенном количестве активной CaO . Так, при содержании активной CaO 12,5% с увеличением удельной поверхности молотого песка прочность и морозостойкость силикатного бетона заметно возрастают.

Силикатные бетоны можно армировать как обычной, так и предварительно напряженной арматурой. Однако при влажном режиме эксплуатации конструкций арматуру следует защищать антикоррозионными составами. При нормальном режиме эксплуатации арматура в плотном силикатном бетоне не корродирует, поэтому силикатные бетоны широко применяют в промышленном и гражданском строительстве наравне с обычными цементными бетонами.

Из тяжелых силикатных бетонов изготавливают все несущие конструкции: панели стен и перекрытий, лестничные марши и площадки, балки, колонны, плиты и другие детали для сборного промышленного, гражданского и сельскохозяйственного строительства. Из прочных силикатных бетонов изготавливают также напряженно-армированные железнодорожные шпалы, тубинги для шахтного строительства и метро, безасбестовый шифер и другие изделия. Силикатный бетон находит применение для строительства сборных покрытий и оснований дорог общего пользования. Он имеет высокую сопротивляемость износу (не более 0,3 мм в год) и высокий коэффициент сцепления с колесом автомобиля (0,65—0,80). Кроме несущих конструкций из силикатных бетонов (с добавкой цемента М400) изготавливают облицовочные изделия, в частности силикатные облицовочные плиты. Их применяют для облицовки кирпичных жилых и промышленных зданий, за исключением цоколей, наружных подоконников, поясков и других частей зданий, подвергающихся значительному увлажнению. Возможность окраски силикатных плит в различные цвета с помощью щелочестойких пигментов позволяет повысить их декоративные качества и широко использовать для архитектурной отделки фасадов зданий.

В настоящее время значительное внимание уделяется развитию производства легких силикатных бетонов с применением пористых заполнителей, например керамзита, аглопорита, вспученного перлита, шлаковой пемзы и др. Вяжущим веществом в таких бетонах служит тонкомолотая известково-кремнеземистая смесь, обеспечивающая приобретение прочности в условиях автоклавной обработки.

9.7.5. СИЛИКАТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРЫ

Силикатные изделия ячеистой структуры могут быть также в виде пено- и газосиликата.

Пеносиликат — камневидный строительный конгломерат ячеистого строения, получаемый смешиванием технической пены с предварительно размолотой известково-песчаной смесью.

Для изготовления пеносиликата берут обычно до 25% молотой извести-кипелки и кварцевый песок. Кроме песка могут быть использованы доменный шлак, золы, трепел, диатомит и другие заполнители с большим содержанием кремнезема. Известь и заполнители подвергают совместному или раздельному измельчению, после чего приготавливают ячеистую смесь путем перемешивания известково-песчаного раствора с устойчивой технической пеной. Готовую ячеистую смесь выпускают из смесительного барабана пенобетоно-мешалки в раздаточный бункер, а затем разливают в форму будущего изделия. По прошествии 6—8 ч пеносиликат в формах направляют в автоклавы для запаривания и отвердевания.

Газосиликат — искусственный каменный материал ячеистого строения, в котором пористая структура известково-песчаной смеси образуется введением газообразователей. Технологический процесс получения газосиликата сходен с процессом производства газобетона и состоит в основном из измельчения извести и песка, приготовления известково-песчаного раствора совместно с газообразователем, формования изделия и запаривания в автоклаве.

Из силикатных бетонов ячеистой структуры изготавливают изделия со средней плотностью 300—1200 кг/м³ и пределом прочности при сжатии 0,4—20,0 МПа. Такие изделия характеризуются мелкопористой структурой, малой теплопроводностью [(0,1—0,35 Вт/(м·К)] и достаточной морозостойкостью. Пено- и газосиликаты с малой средней плотностью (до 500 кг/м³) используют для утепления строительных конструкций и тепловых установок (трубопроводов, котлов и др.). Изделия с пределом прочности 2,5—7,5 МПа и теплопроводностью до 0,29 Вт/(м·К) применяют для изготовления крупноразмерных изделий наружных и внутренних стен, перегородок и перекрытий зданий. Для перекрытий промышленных и жилых зданий изготавливают армопеносиликатные плиты с пределом прочности при сжатии выше 7,5 МПа. Плиты размерами (150—300)х50х(10—14) см не требуют дополнительной теплоизоляции, являются достаточно прочными и долговечными.

9.8. АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

9.8.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Асбестоцементные материалы образуют важную разновидность ИСК, применяемых в кровле (шифер), в виде стеновых панелей, труб и декоративных изделий.

Для изготовления асбестоцементных изделий применяют три основных компонента: цемент и воду, формирующие вяжущую часть этих конгломератных материалов; асбест, который служит активным заполняющим компонентом. Он успешно выполняет функции армирования цементного камня — матрицы в этом ИСК. Состав и структура асбестоцемента обеспечивают изделиям в несколько раз большую прочность при растяжении и изгибе, чем их имеют цементный камень или цементный бетон. Имеются и другие положительные качественные характеристики у этого конгломератного материала: повышенная сопротивляемость ударным нагрузкам, возможность выбора окраски изделий по желанию заказчика, сравнительно малая масса стеновых панелей при использовании теплозащитных вкладышей, высокие теплофизические характеристики, высокая огнестойкость. Поэтому продукция асбестоцементной промышленности пользуется у строителей большим спросом. Кроме традиционного шифера и труб в строительстве широко применяют вентиляционные короба, электроизоляционные доски, изделия «малых форм» — подоконники, оконные сливы и др.

9.8.2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ

На действующих асбестоцементных заводах в качестве вяжущего используют клинкерный портландцемент марок 400 и 500. В нем не допускается содержание добавок, кроме гипса. Количество трех-кальциевого силиката (алита) должно быть не менее 52%, трехкальциевого алюмината — не более 8%, свободной извести — не более 1% (по массе). При автоклавном способе обработки изделий может применяться также песчанистый портландцемент, оптимальное содержание кварцевого тонкоизмельченного песка в котором зависит от количества трехкальциевого силиката в клинкере. С повышением содержания C_3S в клинкере портландцемента увеличивается количество песка. Так, при выработке цемента с алитовым клинкером содержание песка доводится до 45%, а при белитовом клинкере — до 30—35%. Качество добавляемого песка регулируется — должно быть не менее 87% SiO_2 и не более 3% оксидов калия и натрия, а количество пылевидных, илистых и глинистых примесей не должно превышать 10%, в том числе не более 3—5% глинистых частиц размером менее 0,005 мм. Для производства облицовочных изделий применяют белый и цветной портландцемент.

В производстве асбестоцементных изделий в нашей стране в основном используют хризотил-асбест. Он извлекается из серпентиновых пород, в которых расположен в виде жил. Среди крупнейших месторождений следует отметить Баженовское (Урал). Хризотил-асбест является водным силикатом магния — $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. В нем почти всегда встречаются посторонние примеси — закисное железо, карбонаты, сульфаты и сульфиды. По структуре асбест — кристаллический минерал с ярко выраженным волокнистым строением. Каждое кристаллическое волокно хризотил-асбеста состоит, в свою очередь, из огромного числа параллельно расположенных тончайших элементарных кристаллов — волоконца (фибрилл). В технологии асбестоцемента пользуются механическим распушением асбеста до разной степени тонкости волокон. Хризотил-асбест имеет высокую прочность на разрыв по оси волокнистости (до 26,0—35,0 МПа) и достаточно высокую эластичность, хотя имеются также ломкие (хрупкие) разновидности, с пониженной прочностью на разрыв. По данным П.Н. Соколова, средние величины модулей упругости волокон хризотил-асбеста колеблются в пределах от $15,8 \cdot 10^4$ до $21 \cdot 10^4$ МПа. Волокна асбеста имеют поверхностный слой из гидроксильных групп, соединенных со смежным внутренним слоем из ионов магния, что придает поверхности высокую адсорбционную способность, а с водой легко образуют суспензию. Но количество адсорбированной воды на поверхности волокон асбеста сравнительно невелико — до 1,5—2,0%, поэтому при дозировании асбеста этой величиной обычно пренебрегают. Теплопроводность распушенного асбеста составляет 0,05—0,075 Вт/(м·К) в зависимости от его средней плотности, колеблющейся от 35 до 250 кг/м³. Асбест обладает разной длиной волокон — от долей миллиметра до 40 мм. По средней длине волокна и содержанию пыли асбест разделяют на сорта: средняя длина повышается от низшей марки 8-го сорта к высшей марке нулевого сорта.

Для производства асбестоцементных изделий применяют 3, 4, 5 и 6-й сорта асбеста. Более низкие сорта (7-й и 8-й) содержат очень короткие волокна (короче 1 мм), много пыли и «гали» (мелкие куски руды и породы), что снижает армирующие свойства асбеста, поэтому от их применения воздерживаются. Кроме сортности асбест разделяют по маркам. Каждому сорту соответствует несколько марок, отличающихся либо текстурой (полужесткая и мягкая в зависимости от степени расщепления или распушенности волокон в процессе обогащения), либо минимальным остатком (%) на верхнем сите специального контрольного аппарата. Чем выше сорт асбеста и жестче его текстура, тем выше качество изделий. Так, например, 3-му сорту по текстуре соответствуют три марки асбеста с полужесткой текстурой (П-3-70; П-3-60; П-3-50) и две марки с мягкой текстурой (М-3-70; М-3-60); 5-му сорту соответствуют четыре марки асбеста с полужесткой и четыре марки асбеста с мягкой текстурами и т. д.

Вода, используемая для распушки асбеста, промывочных работ и тем более для затворения цемента должна быть свободной от глинистых примесей, органических веществ или продуктов их разложения, минеральных солей. Ее температура в технологическом цикле обычно составляет 30—40°С. Нередко используют рекуперационную воду, которая участвовала в предыдущих циклах технологического процесса. Ее отбирают из нижней части рекуператоров. В ней ограничивают содержание взвешенных веществ (например, не более 100 мг/л), величину рН (не менее 8,5).

Кроме трех основных компонентов в производстве асбестоцементных изделий применяют добавочные вещества — пластифицирующие, уплотняющие, гидрофобизирующие и др., а также пигменты для придания изделию определенной окраски. Особенно важно добавлять вещества, повышающие фильтруемость суспензии на стадии формования листов.

9.8.3. ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Асбестоцементные изделия изготовляют в основном по мокрому способу формования. Значительно реже используют полусухой и сухой способы формования. Последний — при изготовлении только плоских листов и плиток.

Мокрый способ технологии начинается с составления смеси из асбеста нескольких марок, с тем чтобы при формовании обеспечить высокую фильтрующую способность, плотность и водоудержание. После этого производится распушка волокон асбеста. Распушенный асбест тщательно перемешивают с цементом в воде до получения однородной массы. Последнюю разбавляют еще дополнительным количеством воды, в результате чего получается асбестоцементная суспензия, в которую, если требуется, могут вводиться добавочные вещества (добавки). В асбестоцементной суспензии масса воды более чем в 10 раз превышает массу цемента. Готовую суспензию направляют на формование асбестоцементных изделий — листов или труб. При этом большая часть (свыше 96%) свободной воды отфильтровывается и удаляется. Листам придают необходимые размеры и форму. Облицовочные листы и кровельные плитки дополнительно прессуют. Твердение вяжущей части, под влиянием которого асбестоцементные изделия приобретают требуемую механическую прочность, происходит на складах или в автоклавах (при песчанистом портландцементе). Готовым изделиям путем их окраски и лицевой обработки может быть придана необходимая внешняя поверхность.

К настоящему времени установились более или менее определенные составы (смеси) асбеста разных месторождений при производстве асбестоцементных изделий. Они нормируются специальными технологическими картами.

Операция распушивания асбеста в значительной мере обуславливает качество продукции. На первой стадии механической обработки на бегунах в течение 12—15 мин ослабевает связь между тончайшими волокнами асбеста. На второй стадии — в голлендере-пушителе или другом аппарате (6—8 мин) происходит разделение асбеста на тончайшие волокна. Обычно распушка предпочтительнее по мокрому способу, т. е. на бегунах в присутствии воды. Голлендер, т. е. металлический резервуар, внутри которого вращается барабан, снабженный ножами, является всегда гидравлическим пушителем, так как разделение асбеста, обмятого бегунами, на тончайшие волокна происходит в карманах между ножами барабана в результате воздействия быстрых вихревых движений струй воды. В этом же аппарате обычно осуществляется и смешение распушенного асбеста с цементом в водной среде. Воду одновременно с загрузкой цемента добавляют из нижней части рекуператора (сборника отработанной воды).

Асбестоцементная масса сравнительно быстро (за 8—10 мин) приобретает достаточную однородность, так как мельчайшие зерна цемента, несущие на поверхности высокий отрицательный электростатический заряд, быстро осаждаются и прочно удерживаются на развитой поверхности тонковолокнистого асбеста, также несущей высокий, но положительный заряд в водной и щелочной среде. Если используется песчанистый цемент, то и мельчайшие частицы диспергированного песка также осаждаются на волокнах асбеста, хотя и при более продолжительном смешивании суспензии (12—13 мин). Для получения подвижной суспензии требуется на 1 мас.ч. сухой асбестоцементной смеси добавлять не менее 4—5 мас.ч. воды, что уточняется расчетом в зависимости от сортов асбеста в смеси.

Изготовленная асбестоцементная масса поступает в ковшовую мешалку для получения определенного запаса массы, чтобы поддерживать непрерывность работы формовочной машины. Из мешалки масса направляется по желобу в металлические ванны, являющиеся частью листоформовочной машины. Одновременно в желоб непрерывно поступает рекуперационная вода, отбираемая из нижней части рекуператора, что позволяет поддерживать необходимую консистенцию массы. Асбестоцементная суспензия,

поступающая в ванны сетчатых цилиндров листоформовочной машины, обычно состоит из 8—10% сухого вещества на 90—92% воды. Но имеются и другие листоформовочные машины, на которых применяют асбестоцементную суспензию более высокой концентрации, например до 40—45% сухого вещества (в нем до 15% асбеста, до 85% цемента).

Формование листов и других асбестоцементных изделий мокрым способом производится на круглосетчатой формовочной машине (или полусухим — на фильтрующей ленте). Принцип формования изделий состоит в отфильтровывании воды из слоев асбестоцементной массы под влиянием гидростатического давления до необходимого уплотнения (рис. 9.30). С этой целью в металлической ванне 1, наполненной асбестоцементной суспензией, расположен полый каркасного типа цилиндр 2, обтянутый металлической сеткой (сетчатый барабан). На сетке масса осаждается тонким слоем и частично обезвоживается за счет фильтрации воды сквозь сетку. Вода из барабана отводится сначала в сгустители (рекуператоры) для отделения и возвращения в производство не осевшей части асбеста, а затем используется для промывки сетки и сукна и разжижения асбестоцементной массы в желобе. С поверхности барабана слой асбестоцементной массы снимается бесконечной суконной лентой 5. Пройдя на ленте вакуум-коробку 6 (с разрежением примерно 300 мм рт.ст.), предварительно обезвоженная асбестоцементная масса переносится к металлическому форматному барабану 7, который снимает массу с ленты сукна и навивает ее на свою поверхность концентрическими слоями, при этом она уплотняется между вращающимися металлическими цилиндрами. Когда асбестоцементный слой на барабане достигнет необходимой толщины, его разрезают по образующей цилиндра, и сырой лист снимают. Давление прессовой части листоформовочной машины составляет обычно 0,2—0,4 МПа, для второго подрессовочного вала 10,0—12,0 МПа, для пресс-вала — до 40,0 МПа. В результате обжигания содержание влаги в листе значительно снижается и достигает 25%.

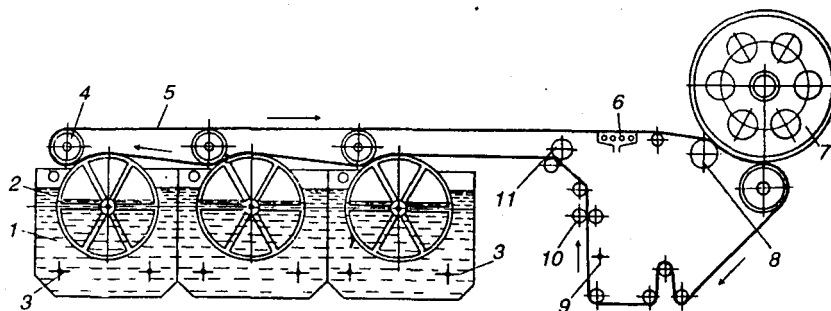


Рис. 9.30. Схема работы листоформовочной трехцилиндровой машины: 1 — ванна; 2 — полные барабаны с сетчатой поверхностью; 3 — асбестоцементная масса; 4 — прижимной валик; 5 — бесконечная лента сукна; 6 — вакуумная коробка; 7 — форматный барабан; 8 — опорный вал; 9 — пресс-вал; 10 — промывное устройство; 11 — отжимные валики

При изготовлении плоских мелких изделий лист дополнительно разрезают на плитки, которые стопками прессуют под высоким давлением (до 40 МПа) на гидравлическом прессе. Если изготавливают волокнистые листы, то волнирование производится на специальных станках скальчатого типа периодического действия. Имеются станки непрерывного действия, которые применяют во всех автоматизированных линиях.

Изделия твердеют в пропарочных камерах при температуре 50—60°C, относительной влажности 90—95% в течение 10—14 ч, а затем 5—7 сут в утепленном складе. Быстрее происходит твердение в автоклаве под действием пара давлением 0,8 МПа, что позволяет использовать песчанистый цемент и исключить выдерживание изделий на складе завода.

При производстве труб принципы формования остаются теми же, но используют специальные трубоформовочные машины со съемными форматными барабанами (скалками). У трубо- и листоформовочных машин не имеется принципиальных отличий в

конструкциях ванн сетчатых цилиндров, вакуумобезвоживающих устройств и устройств для очистки сукна.

При окончании процесса навивания асбестоцементных слоев форматную скалку снимают и устанавливают новую. Чтобы можно было легко вынуть скалку, диаметр трубы несколько увеличивают. С этой целью сетку у концов немного растягивают с помощью металлических клиньев и развальцовывают трубу на специальном каландре.

Сухой способ формования асбестоцементных листов предусматривает распушку асбеста и смешивание его с цементом и песком в сухом виде. Для последующего увлажнения добавляют 12—15% воды, а уплотняют массу на конвейерной ленте катками или под прессом. Твердеют изделия, к которым в основном относятся плитки для пола и облицовочные, в автоклавах. Сухой способ позволяет применять коротковолокнистый асбест преимущественно 6-го сорта.

9.8.4. ПРОДУКЦИЯ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ЗАВОДОВ

Асбестоцементные изделия находят широкое применение при устройстве кровельных покрытий, в стеновых конструкциях, трубопроводах и т. п. Промышленность выпускает волнистые листы, плоские листы непрессованные и прессованные, электроизоляционные доски, некоторые специальные изделия — вентиляционные короба, листы для градирен, детали для сводов метрополитена, панели и др.

Волокнистые листы производят различных размеров по длине, ширине, толщине, шагу и высоте волны, а используют их для кровельных покрытий жилых, общественных и промышленных зданий. В широкой номенклатуре этих листов предусмотрены основные размеры: длина — в пределах от 1200 (листы ВО) до 2500 мм (листы усиленного профиля, унифицированного профиля и др.), ширина листов — от 686 до 1150 мм (в зависимости от профиля). Чем больше размеры по длине и ширине, тем толще листы — от 5,5 до 7,5 мм. Высота и шаг волны листов приняты соответственно в пределах 28—54 и 115—200 мм. В настоящее время предусмотрен выпуск листов пяти профилей. Имеется тенденция к дальнейшему увеличению размеров профилированных и плоских листов, так как при их использовании снижается расход древесины на обрешетку и строительные фермы, уменьшается трудоемкость и сокращаются сроки кровельных работ.

Плоские листы применяют для наружной и внутренней облицовки стен, потолков, перегородок и балконных ограждений. Их выпускают прессованными и непрессованными, с гладкой или тисненой (рельефной) поверхностью.

Для покрытия полов в кухнях, санитарных узлах, магазинах, столовых и других изготовляют плитки размером 150x150x10 (13) мм различной окраски.

Разработан и изготавливается ряд конструкций утепленных асбестоцементных плит для покрытий, например плиты АП, которые утеплены минеральной ватой, плиты АКП из двух асбестоцементных листов, между которыми помещен утеплитель, и др. Разработаны и применяются также асбестоцементные стеновые панели с деревянным каркасом или бескаркасные. Их масса значительно меньше массы панелей из других материалов. Размеры и качественные показатели панелей и листов устанавливают соответствующие стандарты. Размеры крупноразмерных листов — 3600x1500; 3000x1200 мм и др., а мелкоразмерных — 1200x800 мм. Крупноразмерные листы могут выпускаться двоякой кривизны длиной до 5 м (для летних домиков).

Асбестоцементные трубы применяют для устройства водопровода и канализации в населенных пунктах. Безнапорные трубы используют при проведении дренажных линий, строительстве кабельных сетей и т. п. Внутренний диаметр труб (условный) составляет от 100 до 500 мм при длинах 3000 и 4000 мм (что зависит от типа трубоформовочных машин). Увеличивается выпуск труб длиной 5 и 6 м, что снижает количество стыков, расход муфт и уплотнительных колец.

Освоено производство асбестоцементных труб с газонепроницаемыми покрытиями из полимерных материалов. Такие трубы обладают высокой водо-, бензо- и маслостойкостью и надежно заменяют стальные трубы.

9.8.5. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Основные свойства асбестоцемента — прочность и деформативность при воздействии статических и динамических (ударных) нагрузок. Для повышения сопротивляемости изделий воздействию атмосферных осадков, агрессивной внешней среды необходимо также обеспечить их достаточную плотность — водонепроницаемость, минимально допустимое водопоглощение и др. Конкретные показатели качества асбестоцементных изделий определены в соответствующих стандартах. Так, например, согласно ГОСТ 16233—77 в отношении листов волнистых унифицированного профиля УВ среди других требований (формы, размеров, дефектов) предусматривается, что их средняя плотность в высушенном состоянии должна быть не менее $1,75 \text{ г/см}^3$, что обеспечивает величину водопоглощения не более 25%. Минимальный предел прочности при изгибе волнистых листов в поперечном к гребням волн направлении и в зависимости от толщины листа и сортности должен быть, как минимум, в пределах от 15,7 до 19,6 МПа, листы должны быть морозостойкими и выдерживать в насыщенном водой состоянии не менее 25 циклов (у профиля УВ — не менее 50) попеременного замораживания и оттаивания без каких-либо признаков расслоения или повреждения, сохраняя после этого испытания не менее 90% первоначальной величины предела прочности, чтобы при стандартном испытании они были водонепроницаемыми (табл. 9.9).

Таблица 9.9 Физико-технические характеристики асбестоцементных листов (волнистых и плоских)

Показатели	Профиль волнистых листов			Вид плоских листов	
	обыкновенный	усиленный	унифицированный	прессованный	непрессованный
<i>Предел прочности при изгибе, МПа, не менее</i>	15,7	17,2	19,6	250	200
<i>Ударная вязкость, кДж/м², не менее</i>	1,5	1,6	1,6	2,6	2,5
<i>Штамповал нагрузка, кН</i>	—	1,72	2,15	—	—
<i>Средняя плотность, г/см³, не менее</i>	1,6	1,63	1,75	1,8	1,7
<i>Морозостойкость, циклов, не менее</i>	25	25	50	50	25

Прочность труб оценивают в основном пределом прочности при разрыве, что определяется гидравлическим давлением. По величине максимального рабочего давления напорные водопроводные трубы разделяют на классы: до 0,6 МПа — класс ВТ6, до 0,9 МПа — класс ВТ9, до 1,2 МПа — класс ВТ12 и др. Газопроводные трубы по максимальному рабочему давлению разделяют на марки: для газопроводов низкого давления (до 0,005 МПа) — марка ГАЗ-НД, для газопроводов среднего давления (до 0,3 МПа) — марка ГАЗ-СД. Для соединения труб используют асбестоцементные муфты самоуплотняющиеся типа САМ.

К стандартным характеристикам качества асбестоцемента относится еще ударная вязкость, т. е. сопротивляемость изделий ударной нагрузке. Этот важный показатель качества изделий выражается работой, затрачиваемой на разрушение образцов стандартных размеров при ударном воздействии маятника. Так, листы УВ толщиной 6—7,5 мм должны иметь ударную вязкость от 1,5 до 1,8 Дж/м² в зависимости от сорта.

Из нестандартных характеристик качества асбестоцементных изделий в ответственных конструкциях при нагрузках свыше 30—40% от разрушающих часто определяют прочность с учетом ползучести, величину модуля упругости, теплостойкость и некоторые другие показатели свойств.

Ползучесть асбестоцемента по сравнению с бетонами значительно больше, что объясняется большим количеством геля в вяжущей части. По этой же причине величина ползучести и интенсивность ее прироста со временем уменьшаются, так как возрастает объем кристаллизационной структуры в цементном камне и уменьшается объем гелевой составляющей. Испытания показывают, что величина прогиба асбестоцементных плиток, находящихся под нагрузкой, равной 50% разрушающей, в 3—3,5 раза больше величины прогиба, возникающего под влиянием кратковременного воздействия той же нагрузки. Малоаметное проявление ползучести наблюдается при нагрузках, равных 25—35% от разрушающих. Тем не менее прочность асбестоцементных изделий и конструкций всегда рассчитывают с учетом ползучести.

Модуль упругости асбестоцемента зависит от величины нагрузки. Если последняя не превышает 75—85% разрушающей, то модуль упругости при растяжении (асбестоцемент в основном работает на растяжение) равен: 12000 МПа— у непрессованного асбестоцемента со средней плотностью до 1,7 кг/м³, изготовленного на 5-м и 6-м сортах асбеста; 18000 МПа --у прессованного асбестоцемента с объемной массой до 1,9 г/см³, изготовленного на 3-м и 4-м сортах асбеста. При напряжениях, больших чем 75—85% разрушающего, пропорциональность между напряжением и деформацией нарушается, так как удлинение образцов растет быстрее соответствующих напряжений.

Модуль упругости увеличивается по мере повышения плотности и возраста асбестоцементных изделий, а также содержания асбеста.

Теплостойкость — способность асбестоцемента выдерживать без потери прочности высокие температуры. Исследования показывают, что с началом дегидратации гидросиликатов кальция при температуре 300°С начинается понижение прочности асбестоцемента. При температуре 400°С снижение прочности достигает уже заметной величины — до 10—15%. При дальнейшем повышении температуры создаются условия для дегидратации гидрата оксида кальция с новой потерей прочности асбестоцемента (до 45%), поэтому предельной температурой допустимого нагрева обычного асбестоцемента может быть принята температура 500°С, что и является его теплостойкостью.

В целях экономии асбеста, являющегося сравнительно дефицитным природным материалом, предпринимались попытки заменить часть его другими компонентами, сходными в той или иной мере с тонковолокнистой структурой асбеста.

В этом направлении проводились опыты по замене части асбеста стекловолокном, но они показали, что необходимо использовать щелочестойкое стекловолокно, так как обычное оказалось недолговечным и в эксплуатационный период асбестоцемент с добавлением нещелочестойкого стекловолокна быстро разрушался. В настоящее время изучена возможность использования для этих целей мергелевого и базальтового стекловолокна.

На протяжении многих лет в ряде стран до 10—12% асбеста в производстве асбестоцементных изделий заменялись базальтовой минеральной ватой, которая обладает щелочестойкостью, сравнительно высокой коррозиестойкостью. Предпринимались положительные попытки заменять часть асбеста органическими заполнителями, например целлюлозой, кострой (отход от переработки льна и конопли), что при условии их предварительной минерализации, например обработкой раствором хлористого кальция, дает эффект снижения расхода асбеста без заметного снижения качества асбестоцемента,

особенно при сухой технологии изготовления изделий. Заменой асбестового волокна стремились также понизить опасность применения асбеста в связи с подозрениями на его канцерогенность. Как установлено в настоящее время, такая опасность была сильно преувеличена и практически она весьма мала с безусловным сохранением асбеста как ценного сырья в производстве строительных материалов и изделий. Для повышения химической стойкости стекловолокна в зарубежных предложениях рекомендуется вводить оксиды циркония, а также новые составы стекловолокна.

9.9. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

На основе магнезиальных вяжущих веществ изготавливают ксилолит, фибролит, штукатурные растворы, некоторые архитектурные изделия, реже — бетоны.

Ксилолит — нередко именуемый и как магнолит, относится к типу деревобетонов и представляет собой мелкодисперсный конгломерат, в котором спрессованные древесные опилки и, возможно, древесная мука сцементированы в прочный и плотный каменный материал с помощью цемента Сореля. Последний готовится из каустического магнезита путем его затворения водным раствором хлористого магния (MgCl_2). Соответствующие пластичные смеси ксилолитовой массы с красителем используют для устройства бесшовных полов, а без красителей — для устройства оснований под чистые полы из плиточных и рулонных полимерных материалов. Уложенный слой ксилолита уплотняют, циклюют, затирают и шлифуют. Из жесткой ксилолитовой массы прессуют плиточный материал для полов и ступеней в горячем состоянии под давлением 30 МПа. Обе разновидности полов отличаются бесшумностью, малой теплопроводностью, значительной твердостью (5—7,5 а для плиток 10—14 по Бринелю) и большой прочностью: при сжатии 20—40 МПа, при растяжении 3—5 МПа. Полы гигиеничны, негорючи и долговечны.

В отличие от других неорганических вяжущих каустический магнезит, как отмечено выше, затворяется не на воде, а на водном растворе хлористого или сернокислого магния. Для затворения возможно применять и некоторые другие соли — ZnCl_2 , FeSO_4 и др. Соотношение по массе: MgO — 62—67% и $\text{Mg Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 38—33% (в пересчете на активный оксид магния). Для снижения гигроскопичности и повышения водостойкости допускается вводить в смесь железный купорос FeSO_4 с заменой до 50% раствора хлористого магния. Целесообразное соотношение по массе компонентов ксилолита устанавливают экспериментальным путем, причем всегда желательно использовать общий метод проектирования состава ИСК.

В качестве органического заполнителя можно применять не только опилки, но и древесную шерсть, древесную стружку хвойных пород, льняную костру и др.

Фибролит изготавливают в виде конструктивно-теплоизоляционного или теплоизоляционного материала, чаще всего плит толщиной 30, 50, 75 и 100 мм, шириной 500—600 мм, длиной до 2500 мм. Масса стружки или древесной шерсти составляет около 30% массы фибролита. В качестве вяжущего вещества чаще всего используют портландцемент, цемент Сореля.

Смесь, соответствующую составу фибролита, укладывают в формы и прессуют. Она твердеет в обжатом состоянии. Плиты сушат на заводе до влажности 15—20%. В зависимости от плотности (в кг/м^3) фибролит подразделяют на марки: Ф300, Ф400 и Ф500. Теплопроводность плит 0,7—1,0 Вт/(м·К) при температуре 20°C.

При добавлении к магнезиальному вяжущему веществу поризующих ингредиентов возможно получить не менее эффективные, чем фибролит, теплоизоляционные материалы — пеномагнезит и газомагнезит.

Изложенное выше почти в полной мере относится и к использованию в качестве вяжущего вещества каустического доломита, хотя приходится учитывать его значительно меньшую прочность, чем каустического магнезита — в два-три раза. Вместе с тем оба этих магнезиальных вещества остаются воздушными и не обеспечивают стойкую микроструктуру ИСК на их основе при длительном контакте с водной средой.

Кроме горных пород магнезита и доломита в качестве сырья для получения магнезиальных вяжущих веществ используют техногенное магнезиальное сырье более сложного химического состава. Оно является попутным продуктом добычи и переработки горных пород ультраосновного состава при получении железа, меди, алмазов, асбеста и других полезных ископаемых. По ориентировочным подсчетам на горно-обогатительных

комбинатах нашей страны такого техногенного сырья скопилось более 900 млн.т. Особенно эффективные диоксидсодержащие попутные продукты получают от переработки магматических и некоторых метаморфических пород, содержащих диоксиды. На основе такого рода попутных продуктов вырабатывают модифицированный цемент Сореля, портланд-цементный клинкер, строительные пигменты, бетоны плотные тяжелые и пористые легкие, другие строительные материалы (по данным исследований В.В. Прокофьевой).

9.10. КОРРОЗИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

Выше были рассмотрены многие разновидности материалов и изделий, получаемые на основе неорганических вяжущих веществ. Наибольшее применение в строительстве находят цементный бетон и железобетон. Изделия и конструкции из них, находясь в эксплуатационных условиях, в основном следуют трем этапам долговечности — упрочнению, стабилизации и деструкции (см. 4.2). Деструкция чаще всего носит характер коррозии, поскольку соответствующие процессы ее в значительной мере протекают под влиянием химических реакций и физико-химических воздействий.

Бетоны и цементный камень, как его матричная часть, в эксплуатационных условиях подвержены коррозионному воздействию различных сред, особенно минерализованной воды в морских сооружениях (молы, причалы, эстакады со свайным основанием и железобетонным верхним строением, портовые конструкции и др.), минеральной кислоты при эксплуатации резервуаров, башен и других сооружений химической промышленности. На бетон оказывают коррозионное воздействие органические кислоты и биосфера, особенно при работе сооружений в торфяных грунтах, на предприятиях пищевой промышленности. Негативное влияние могут оказывать на состав и структуру цементного камня в бетонах щелочная среда, пресная вода, особенно водные растворы электролитов. В промышленных районах коррозионное влияние на бетонные конструкции оказывают газы, например сернистые, сероводород, хлористый водород, аэрозоли солей, например морской воды и др. Агрессивное воздействие оказывают также твердые, в основном высокодисперсные вещества, способные образовывать во влажных условиях прослойки из истинных и коллоидных растворов. Кроме химических реакций при контакте со средой возможны физические сорбционные процессы с поглощением из среды поверхностно-активных веществ (ПАВ), например серосодержащих полярных смол из нефтепродуктов, с физическим нарушением сплошности контактов в структуре и ускорением развития дефектов.

Сущность коррозионного воздействия различных агрессивных факторов выражается либо в растворении структурных компонентов цементного камня и последующего процесса вымывания растворов силой напора или под влиянием диффузии, либо в образовании новых химических соединений в цементном камне, способных растворяться в жидкой омывающей среде, например в воде, или образовывать тончайшие суспензии и выноситься под влиянием диффузии или фильтрации, либо в кристаллизации или набухании новообразований с явлениями последующего механического напряжения внутри цементного камня и микротрещинообразования. Отметим, например, что наиболее распространенным видом разрушения железобетонных свай в морских причалах является постепенное появление продольных трещин и шелушение поверхности.

При прогнозировании долговечности обычно исходят из данных определения параметров процесса коррозии, экспериментально получаемых в условиях, тождественных или близких к эксплуатационным. Среди параметров коррозии бетона: скорость продвижения в глубь агрессивного фронта; глубина поражения коррозией бетона; толщина слоя бетона, потерявшего прочность на сжатие или растяжение (что может быть определено с помощью формулы); коэффициент агрессивности или критерий коррозионного повреждения, выражаемый по допустимому снижению прочности; изменение концентрации одного из компонентов, например кальциевых солей, возникающих как продукт взаимодействия минералов цементного камня и кислот — внешней агрессивной среды, и другие возможные параметры эксперимента.

Процессы коррозии бетона и железобетона детально изучались в научно-исследовательских институтах (например, работы В.М. Москвина в НИИЖБе и др.).

При воздействии на бетон пресной *безнапорной* воды происходит ее диффузия в тело бетона и цементного камня. Объемная и поверхностная диффузия воды сопровождается

растворением кристаллического гидроксида кальция при некоторой потере прочности цементного камня.

Вместе с тем вода благоприятствует интенсификации дополнительной гидратации цемента, ранее не вступившего в реакцию с водой затворения в бетоне. Если пресная вода была жесткой (с высоким содержанием бикарбоната кальция), то возникает упрочнение структуры в связи с кристаллизацией в порах средней соли углекислого кальция (карбоната): $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 = 2\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$. Эффект упрочнения в первый период эксплуатации конструкции может оказаться эффективнее снижения прочности от растворения кристаллического гидроксида кальция. Очевидно, что первый период (первый временной элемент долговечности) окажется с тем большим эффектом упрочнения, чем больше в теле бетона осталось негидратированного цемента. Первый период сменяется относительной стабилизацией структуры и свойств цементного камня, поскольку процесс диффузии воды и деструкции тормозится уплотнившейся структурой цементного камня, особенно если в смесь были введены активные кремнеземистые добавки. Таким образом, хотя коррозия явно выражена (растворение гидроксида кальция), но она завуалирована (может регрессировать до равновесного минимума).

Если пресная вода действует на бетонное сооружение, например плотину, перемычку и т. п., *под напором*, то протекает не столько диффузионный, сколько фильтрационный процесс. После растворения части кристаллического гидроксида кальция равновесие не устанавливается, как в случае безнапорного действия воды. Процесс вымывания раствора $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (выщелачивание) ускоряется по мере увеличения размера и количества пор после выщелачивания, а также при снижении жесткости напорной воды. Здесь можно отметить, кстати, что наиболее сильно известь в бетоне растворяет дистиллированная вода. В целом при воздействии напорной воды этапы упрочнения и стабилизации структуры очень малы, но их можно несколько увеличить введением активных кремнеземистых добавок с образованием в теле цементного камня и бетона водонерастворимых гидросиликатов кальция ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Этому же в некоторой степени способствует повышение плотности структуры за счет оптимизации состава бетона и применяемого цемента. Таким образом, в этом случае коррозия не только явно выражена, но она и прогрессирует, удаляя из бетона кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

При воздействии на бетон минерализованной воды, например морской, возможны разные виды коррозии, когда анион SO_4^{2-} взаимодействует с катионом кальция Ca^{2+} , образуя в присутствии воды $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, т. е. кристаллический двухводный гипс, слабо растворимый в воде, но вследствие роста кристаллов создающий в порах механическое напряжение и трещины. Если в воде мало анионов SO_4^{2-} , то возможно ожидать другую реакцию $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 3(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + 19\text{H}_2\text{O} = 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$. Новое кристаллическое вещество именуется эттрингитом и отличается в 3 раза большим объемом, чем кристаллы исходного гидроалюмината кальция ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), что приводит к еще более интенсивному росту напряжений внутри цементного камня и микротрещинообразованию. Кристаллы эттрингита образуются в цементном камне и при проникновении в поры и капилляры раствора сернокислого натрия, или мирабилита ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Чтобы уменьшить сульфатную коррозию бетона, используют цементы с пониженным содержанием в нем $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, добавляют активные кремнеземистые вещества.

Растворы солей соляной кислоты, так же как и серной, либо косвенно (например, NaCl способствует растворению $\text{Ca}(\text{OH})_2$), либо непосредственно способствуют коррозии бетона. Так, например, хлористый магний приводит от взаимодействия и реакции с известью к образованию легко растворимого и вымываемого хлористого кальция и тончайшей суспензии гидроксида магния: $\text{MgCl}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaCl}_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$. В результате кристаллический и прочный $\text{Ca}(\text{OH})_2$ разрушается в теле бетона. Деструкции благоприятствуют атмосферные условия — циклическое увлажнение и высыхание, замораживание и оттаивание бетона, а также напряженное состояние конструкций.

Несравненно большую опасность, чем минерализованная вода, на бетон оказывают кислоты. Практически все кислоты приводят к коррозии цементного камня, поскольку в нем содержится большое количество кристаллического $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Так, например, серная кислота приводит в конечном счете к «гипсовой» коррозии, так как $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Азотная кислота, растворяясь в воде, диссоциирует на ионы H^+ и NO_3^- и поэтому взаимодействует с основаниями, основными окислами и солями подобно другим кислотам: $2\text{HNO}_3 + \text{CaO} = \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O}$; $2\text{HNO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O}$; $2\text{HNO}_3 + \text{CaCO}_3 = \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Образующаяся кальциевая селитра растворима в воде, и таким образом постепенно происходит выщелачивание извести с потерей плотности и прочности цементного камня. Разрушают кристаллический $\text{Ca}(\text{OH})_2$, именуемый часто как портландит в цементном камне, все неорганические кислоты, в том числе и угольная; последняя — через стадию растворимого бикарбоната кальция.

Однако среди минеральных кислот имеются и исключения, например кремниевая или кремнефтористо-водородная кислоты. Соли кремниевой кислоты, называемые силикатами (например, CaSiO_2), нерастворимы в воде, за исключением солей натрия и калия (Na_2SiO_3 , K_2SiO_3), которые, однако, практически не возникают в теле цементного камня. Чаще под влиянием растворения кремниевой кислоты могут возникать коллоиды и студни (гели), особенно в присутствии гидрокремнезема, например опала, способные либо набухать и создавать опасные внутренние давления, либо высыхать и увеличивать прочность за счет дополнительного эффекта склеивания частиц. Из органических кислот опасности не представляет щавелевая кислота, так как ее кальциевые соли нерастворимы в воде и уплотняют поры. «Ядом» для цемента и цементного камня являются сахар и другие более сложные углеводы, т. е. органические вещества, молекулы которых содержат альдегидную ($\text{R}\cdot\text{CHO}$) или кетонную ($\text{R}_2\cdot\text{CO}$) группу и гидроксильные группы. С ними протекают реакции с образованием либо труднорастворимых комплексных веществ типа $\text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_4\text{H}_2\text{O}$ и др., либо легкорастворимые в воде сахарат и глюкозат кальция, алюминия или железа. Они вымываются из тела бетона, оставляя каверны и поры вместо прочного кристаллического $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Органическая коррозия, возникающая под влиянием растительных масел, фруктовых и овощных соков, животных жиров или других органических веществ биогенного и небиогенного происхождения (например, при производстве синтетических каучуков), наносит чувствительный вред бетонным и железобетонным конструкциям. Каждый раз в результате соответствующих реакций образуются легко растворимые соли кальция, снижается водородный показатель (pH) жидкой фазы, что само по себе уже способствует разложению гидратированных минералов цементного камня, нарушению общего равновесия в теле бетона.

Щелочи менее агрессивны, чем кислоты и минерализованные воды, но и они способствуют деструкции цементного камня вследствие их кристаллизации с образованием кристаллизационного давления в порах.

Из газовых агрессивных сред особого внимания заслуживает газообразный сероводород. Цементный бетон в этой газовой среде подвержен коррозии с увеличением в составе сульфатов, появлением реактивной серной кислоты.

Не возникает коррозии бетона в среде минеральных масел и других нефтепродуктов, если они не содержат полярных групп в молекулах или не попадают с водой затворения.

Процесс коррозии прослеживается не только прямыми, но и косвенными методами, например по увеличению проницаемости среды за счет интенсификации диффузии, фильтрации, по изменению механических показателей цементного камня или бетона, особенно прочности, ползучести, снижению морозостойкости и т. п. Анализ кинетики коррозионного процесса показывает, что интенсивность взаимодействия структурных элементов цементного камня с химически активными (агрессивными) компонентами внешней среды зависит от величин его внешней и внутренней (особенно поровой) поверхности, структуры порового пространства. В ходе диффузии активных ионов они относятся к основным поглотителям с соответствующим химическим перерождением

микроструктуры цементного камня. Зная предельно допустимое количество агрессивного компонента, при котором химическое перерождение достигает критического уровня для целостности структуры, и скорость диффузии агрессивного компонента (хотя и меняющуюся во времени), можно с известным приближением определить долговечность цементного камня (и бетона) в строительной конструкции, подверженной влиянию внешней агрессии.

Коррозии подвержены не только плотные, но и пористые, в том числе ячеистые, бетоны, получаемые с помощью автоклавного твердения. Одним из агрессивных факторов, которые воздействуют на газобетон в ограждающих конструкциях, является углекислый газ в атмосфере. Под влиянием его адсорбции гидросиликатный кристаллический каркас в стенках ячеек газобетона существенно изменяется, поскольку образуется карбонат кальция и выделяется гель кремнекислоты. Содержание кристаллической части уменьшается по объему, количество химически связанной воды в гидратах снижается, прочность падает, деформации становятся в большей мере необратимыми, постепенно переходя в деформации ползучести, модуль упругости также уменьшается. В результате газобетон, особенно в промышленных зданиях, где концентрация углекислоты значительно больше, чем в обычной атмосфере, претерпевает деструкцию, тем более если под влиянием механических нагрузок он находится в напряженном состоянии.

В легких бетонах с содержанием органических заполнителей (типа арболитов) действуют внутренние факторы, которые вместе с внешними могут приводить к значительной деструкции, если в технологический период не были предусмотрены необходимые меры по стабилизации структуры. Качество древесных заполнителей главным образом оценивают по содержанию в них вредных для цемента экстрактивных веществ, гемицеллюлозы и крахмала, нередко называемых «цементными ядами», поскольку они способны переводить часть прочной кристаллической фазы цементного камня в водорастворимые кальциевые сахара.

Своеобразной, спонтанно развивающейся коррозии подвержены бетоны на основе глиноземистого цемента. Этот быстротвердеющий цемент незаменим при строительстве конструкций ограниченной долговечности и временных сооружений, а также при химической защите, но, главное, при получении огнеупорных бетонов. Однако он способен снижать прочность бетона в связи с превращением одних новообразований (минералов) цементного камня в другие, что весьма ограничивает возможность его применения в капитальном строительстве. Механизм снижения прочности происходит под влиянием конверсии (изменения) условий, в которых находится бетон. При обычных температурах в нем длительно сохраняются метастабильные монокальциевый гидроалюминат САН_{10} и двухкальциевый гидроалюминат $\text{С}_2\text{АН}_8$ в виде кристаллов гексагональной формы. Однако как только температура окружающей среды повысится (например, от 20 до 40°C), метастабильные соединения переходят в стабильные в виде кубических кристаллов трехкальциевого гидроалюмината $\text{С}_3\text{АН}_6$, а также в гель глинозема АН_3 (гиббсит). Очень медленный процесс такого перехода возможен и при обычных температурах. В обоих случаях увеличивается пористость цементного камня и бетона, так как плотность метастабильных образований находится в пределах 1,75--1,95 г/см³, тогда как плотность кубического гидроалюмината и геля равна соответственно 2,53 и 2,40 г/см³. Пористость снижает прочность бетона. С повышением водоцементного отношения быстро растут скорость конверсии соединений, пористость и снижается прочность бетона.

Повысить стойкость бетонов к процессам коррозии и затормозить деструктивные процессы в цементном камне и бетоне можно рядом технологических мероприятий. Наиболее существенными мерами являются: ограничение содержания $\text{С}_3\text{S}$ (например, до 50%), чтобы уменьшить содержание в цементном камне Ca(OH)_2 ; введение аморфных кремнеземистых добавок в цемент для химического связывания гидроксида кальция; повышение плотности с помощью ПАВ; использование по возможности жестких

бетонных смесей и придание бетону оптимальной структуры; снижение концентрации в бетоне дефектов усадочного характера (например, с помощью микронаполнителей); применение гидрофобизаторов в смесях и др.

При воздействии на бетон кислотосодержащих сред его защищают слоями из кислотоупорного цемента (оштукатуривание, торкретирование и др.).

Специальные сульфатостойкие портландцементы весьма необходимы при приготовлении бетонов, работающих в условиях воздействия растворов сульфатов и растворимых в воде оснований (щелочей). В предэксплуатационный период приносят пользу пропитка поверхностного слоя бетонов растворами уплотняющих веществ, например флюатов, полимерами и мономерами, а также оклеивание изоляцией. В период эксплуатации конструкций окажутся эффективными периодическая обработка поверхности с помощью пескоструйных аппаратов, придание изделиям и конструкциям форм, исключающих скопление агрессивной среды; устранение щелей, пазух и других полостей; их надежная герметизация. Комплекс такого рода мероприятий благоприятствует увеличению долговечности бетона в конструкциях.

Искусственные строительные конгломераты на основе органических вяжущих веществ

10.1. ОСНОВНЫЕ ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИСК

Строительные конгломераты на основе органических вяжущих веществ, как и предыдущая группа их на основе неорганических вяжущих, относятся к безобжиговым, так как отвердевание их происходит при обычных температурах и температурах не выше 180—220°C. К ним относятся грубозернистые бетоны и мелкозернистые (песчаные) растворы, изготавливаемые на битумных связующих веществах, называемые асфальтовыми бетонами, а если в них приняты дегтевые связующие вещества — дегтебетонами. По характеру технологий и применяемым в них сырьевым материалам, оборудованию и энергетическим ресурсам, плотности и другим свойствам получаемые разновидности бетонов и изделий могут значительно отличаться друг от друга. Но они продолжают оставаться, как и другие ИСК, подобными между собой при оптимальных структурах. Тогда они характеризуются действием общих закономерностей, научных принципов на технологических стадиях их производства и применения. Они содержат матричную часть в виде вяжущего вещества и заполняющий их компонент. В них, как и в других ИСК, присутствует капиллярно-поровый объем и контактные зоны, но со своими, специфическими особенностями в составах, размерах и количественных показателях. Ниже излагаются более подробно характеристики искусственных конгломератов на основе органических вяжущих веществ, их разновидности и применяемые для их изготовления исходные материалы, в первую очередь органические.

Вяжущая часть (матрица), как гетерогенная система в асфальтовых ИСК, складывается, по аналогии с другими, из жидкой — дисперсионной — среды, в качестве которой выступают органические связующие вещества, и из твердой дисперсной фазы — порошкообразного компонента, являющегося обычно разновидностью горной породы в высокодисперсном ее состоянии. Органические связующие вещества используют не только в асфальтовых и дегтевых бетонах, но и в производстве более широкой группы кровельных и гидроизоляционных материалов и изделий.

Органические связующие вещества представляют собой природные или искусственные твердые, вязкопластичные или жидкие (при комнатной температуре) материалы, состоящие из химических соединений, в молекулах которых содержатся атомы углерода, и потому называемые органическими. Все они способны гореть. Но известно, что химических соединений с содержанием в молекуле углерода и способных гореть — абсолютное большинство. Лишь около трехсот тысяч соединений (из семи миллионов известных) не содержат в молекулах этого атома. Поэтому в отношении органических связующих веществ необходимо внести определенные ограничения. Все они должны обладать вяжущими (цементирующими) свойствами, способностью растворяться в органических растворителях, за некоторым исключением из этого общего правила, — когда они только набухают в растворителях (бензоле, толуоле, керосине, лигроине и др.). Они также обладают достаточной адгезией к минеральным зернистым материалам, сцепляя их в микро- и макродисперсные конгломераты, являются в той или иной мере гидрофобными веществами.

К органическим связующим веществам относятся: битумы, дегти и пеки, производные от битума и дегтя — битумные эмульсии и пасты, битумно-дегтевые, битумно-резиновые, битумно-полимерные, дегте-полимерные и некоторые другие связующие вещества, в том числе олигомеры, полимеры и сополимеры. В такой многообразии они в основном используются в гидроизоляционных материалах. Сравнительно ограниченное количество их применяется в конструкционных ИСК типа бетонов, растворов и в изделиях из них.

Ниже достаточно подробно рассмотрены основные исходные вещества — битумы, дегти и полимеры. Учитывая особую значимость полимеров в современном строительстве, представляется целесообразным рассмотреть их в отдельной главе.

10.1.1. БИТУМЫ

Битумы — органические вещества черного или темно-бурого цвета, состоящие из смеси сравнительно высокомолекулярных углеводородов и неметаллических производных, т. е. соединений углеводородов с серой, азотом или кислородом. При комнатной температуре битумы находятся в твердом, вязком, вязкопластичном и жидком состояниях. Они полностью растворяются в бензоле, толуоле, ксилоле, хлороформе, сероуглероде и некоторых других органических растворителях. При нагревании переходят в легкоподвижные жидкости, при охлаждении — вновь загустевают. Их истинная плотность около 1 г/см^3 .

Битумы имеются природные и искусственные, т. е. получаемые из нефти в заводских условиях и именуемые как нефтяные.

Природные битумы образовались в естественных условиях из нефти в результате очень длительного воздействия на нее климатических и геологических факторов, протекания процессов окисления и полимеризации углеводородов, испарения легких нефтяных фракций. Природные битумы залегают в верхних пластах земной коры или скапливаются в виде поверхностных озер.

При пластовой форме залегания природным битумом пропитаны известняки, доломиты, песчаники и другие пористые горные породы. В них битум содержится в количестве 5—20% по массе и более, а породы носят название битуминозных, или асфальтовых. При содержании битума в породах более 10% целесообразно его извлекать, чтобы использовать в технологии как связующий компонент. Наиболее распространенные способы извлечения битума из горных пород — выварка в воде и экстрагирование органическими растворителями.

По первому способу асфальтовую горную породу дробят на частицы размером 6—10 мм и погружают в котел с водой. В воду добавляют соляную кислоту для лучшего отделения битума от минеральных частиц. Смесь измельченной горной породы с подкисленной водой кипятят при постоянном перемешивании. Битум всплывает на поверхность обычно в виде пены, которую вычерпывают, а в отстойниках отделяют от воды. Нагреванием природный битум подсушивают и, если требуется, сгущают продувкой воздуха. Полностью извлечь битум из горной породы не удастся.

По второму способу измельченную породу обрабатывают в котлах или специальных емкостях органическим растворителем, в котором битум растворяется. При этом удобнее и выгоднее применять негорючую и более дешевую жидкость, например трихлорэтилен. Битум из раствора легко извлекается выпариванием растворителя. При температуре около 100°C удаляют последние частицы растворителя, а при более высокой температуре битум сгущают продувкой воздуха до желаемой вязкости. Первый способ экономичнее второго, но значительная часть битума теряется. При втором способе извлечение его почти полное. При малом содержании битума в породах извлекать его непродуктивно; такие породы измельчают до порошкообразного состояния; полученный асфальтовый порошок используют в качестве высококачественной добавки в асфальтовых бетонах, мастиках, антикоррозионных покрытиях.

Нефтяные битумы получают из нефти. Путем ее нагревания выделяют жидкие горючие компоненты — бензин, лигроин, керосин. Далее, при температуре $300\text{—}400^\circ\text{C}$, отгоняют машинные, веретенные, трансформаторные и другие смазочные масла. Выделение этих масел из нефти ведется под вакуумом. В результате разделения (разгонки) нефти на горючие и смазочные вещества в емкости остается густой смолистый остаток, содержащий твердые частицы, — гудрон. Он является исходным сырьем для получения полутвердого и твердого битума, но может использоваться и без переработки, как жидкий битум. Экономически более выгодно получать битум из тяжелых нефтей, в которых масса остатка (гудрона) составляет до 7—8%, тогда как в легких нефтях — не выше 1%.

Разработан ряд способов получения нефтебитума: атмосфер-но-вакуумной перегонкой (остаточные битумы); окислением гудро-нов кислородом воздуха (окисленные нефтебитумы); окисление способом продувки воздухом крекинг-остатков, образующихся при переработке мазута способом крекинга, — при высоких температурах и больших давлениях (крекинговые битумы); осаждением асфальтено-смолистой части гудронов пропаном (битумы деасфальтиза-ции); переработкой кислых гудронов (кислотные битумы).

Наиболее распространен способ получения окисленных нефтяных битумов из гудрона. На процесс окисления влияют исходная вязкость гудрона, расход воздуха, продолжительность и температура окисления, которая обычно находится в пределах 250—280°C. Битумы получают периодическим или непрерывным окислением. На рис. 10.1, а показана технологическая схема производства окисленного битума периодическим способом, который осуществляется в битумных (асфальтовых) кубах. Эта установка может работать также и непрерывным способом, при котором гудрон продувается воздухом одновременно в нескольких кубах, располагаемых последовательно (рис. 10.1, б).

Высокого качества нефтяной битум получают непрерывным окислением на установке трубчатого типа (рис. 10.2). Эта установка состоит из вертикальных труб диаметром 200 мм и высотой 10м, соединенных переходными звеньями. Общая длина труб аппарата 310 м, рабочая вместимость аппарата 9,75 м³.

Подача воздуха и битума — исходного и рециркулята, осуществляется с одного конца, а другой конец реактора 1 соединен с сепаратором 3, в котором происходит отделение газа от битума. Газ после отделения тяжелых фракций сжигают в печи дожига 2, а битум частично идет на рециркуляцию, а частично перетекает в продуктовый бак 4. Реакции окисления проходят при температуре 260—270°C. Производительность одного реактора 15—17 т/ч битума с температурой размягчения 85—90°C по КиШ или удельная эффективность аппарата 1,54—1,74 т/чм³. Принудительная рециркуляция битума в трубчатых реакторах создается циркуляционными насосами различной конструкции, преимущественно шестереночными или паровыми поршневыми. Устойчивость процесса окисления в трубчатых реакторах обеспечивается рециркуляцией окисленного битума. В его поток перед насосом подается сырье, подлежащее окислению. Чем больше кратность циркуляции, тем устойчивее проходит процесс окисления, что, однако, увеличивает расход электроэнергии.

На непрерывно действующей трубчатой установке используется и принцип эмульсионного окисления сырья; для этого в гудрон, протекающий по трубам, вдувают воздух, который вспенивает массу. Образующаяся битумная пена окисляется в змеевике реактора.

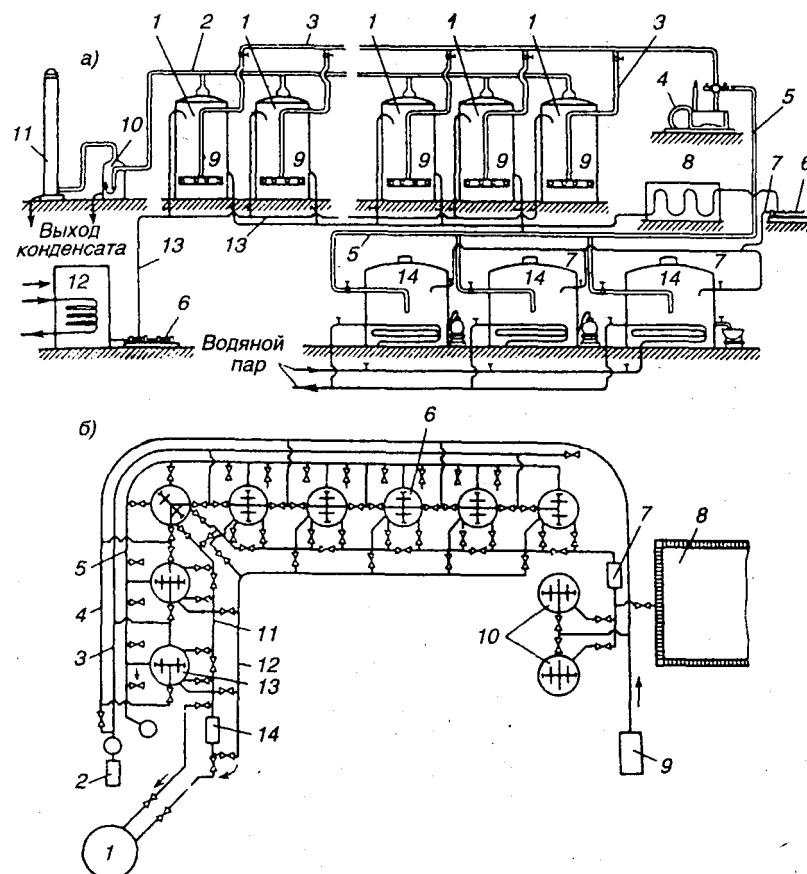


Рис. 10.1. Технологическая схема производства окисленного битума: а — в установках периодического действия: 1 — битумный куб; 2 — труба для отвода отработанного воздуха и газа; 3 — труба для подачи воздуха; 4 — компрессор; 5 — воздушная магистраль; 6 — насосы; 7 — магистраль для подачи битума; 8 — холодильник для охлаждения битума; 9 — маточник; 10 — газосборник; 11 — дымовая труба; 12 — теплообменник (емкость) для тяжелого нефтяного остатка; 13 — магистраль для подачи гудрона; 14 — раздаточник; б — в установках непрерывного действия: 1 — емкость для сырья; 2 — компрессорная установка; 3 — воздушная магистраль; 4 — паровая магистраль; 5 — обратная воздушная магистраль с ловушками; 6 — битумные кубы; 7 — насос; 8 — аварийная емкость; 9 — парообразователь; 10 — раздаточник; 11 — подающая магистраль; 12 — обратная магистраль; 13 — насос; 14 — куб

Газы и пары выбрасываются в атмосферу, а окисленный битум стекает в приемный бак. Продолжительность окисления намного сокращается по сравнению с другими способами производства, а качество битума выше, чем при окислении в кубах.

Производство крекинговых битумов, которые тоже могут быть остаточными и окисленными, основано на расщеплении сырья при высоких температурах (до 450°C) и давлении (до 5 МПа). Мазут распадается на более легкие и устойчивые углеводороды и на менее легкие и неустойчивые углеводороды и их производные. Неустойчивые углеводороды в процессе полимеризации образуют асфальтено-смолистые вещества. Остаточные крекинг-битумы получают путем перегонки под вакуумом крекинг-остатков; окисленные — окислением тех же остатков в кубовых или трубчатых установках воздухом по технологическим схемам, принятым для производства обычных нефтяных битумов из гудронов.

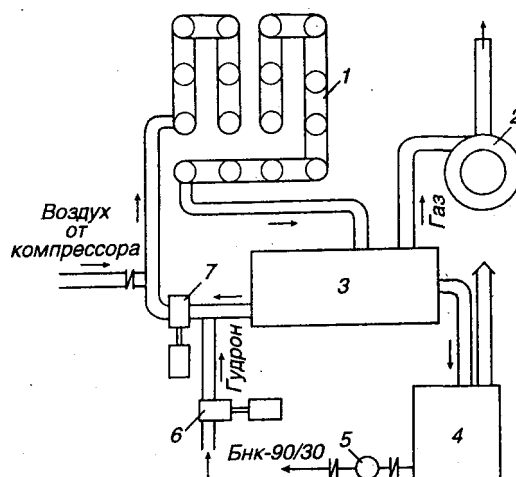


Рис. 10.2. Технологическая схема окисления битума на непрерывно-действующей трубчатой установке:

1 — реактор; 2 — циклонная печь для сжигания газа; 3 — сепаратор; 4 — продуктовый бак; 5 — продуктовый насос; 6 — насос сырьевой паровой; 7 — насос циркуляционный паровой

Битумы деасфальтизации получают из гудрона, обрабатываемого предварительно пропаном или дихлорэтиловым эфиром (хлорек-сом). С помощью такой обработки из масляного гудрона извлекается дополнительное количество горюче-смазочных фракций, тогда как асфальтены и тяжелые смолы оседают, образуя экстракт с малым содержанием масел. Из этого экстракта испаряют растворитель и получают битум, именуемый экстрактным (или битумом деасфальтизации). Он отличается невысоким качеством, имеет повышенную хрупкость при низких температурах. Для уменьшения вязкости этих битумов приходится перед употреблением смешивать их с гудроном.

Состав, структура и свойства битумов (природных и нефтяных) имеют некоторые непринципиальные различия. Вместе с тем, они характеризуются сложным и многообразным составом основных углеводородов, главным образом метанового (C_nH_{2n+2}), нафтенового (C_nH_{2n}) и ароматического (C_nH_{2n-6}) рядов. В состав основных углеводородных соединений битума обычно входят также кислород, азот, сера, ванадий, железо, никель и другие элементы. Основная часть молекул битума состоит из 25 — 150 атомов углерода. В зависимости от числа атомов в молекулах и их взаимного расположения изменяются свойства вещества. Например, чем больше молекулярная масса одного и того же соединения, тем сильнее в нем межмолекулярное взаимодействие. Молекулярная масса молекул битумов составляет 400—5000. Ароматические углеводороды имеют повышенную устойчивость при воздействии теплоты, кислорода и ультрафиолетовых лучей; их окисление сопровождается образованием смол. Метановые углеводороды (парафины) представляют собой прямые цепи, состоящие из многократно повторяющихся звеньев $-CH_2-$ с металными группами $-CH_3$, при отрицательных температурах способны выкристаллизовываться, ухудшая свойства битумов. Нафтеновые углеводороды при окислении частично переходят в смолы.

Элементарный состав битумов колеблется в пределах: С — 70—87%, Н — 8—12%, О — 0,2—12%, S — 0,5—7%, N — до 1%. В нефтяных битумах содержание кислорода меньше (до 2%), чем в природных, а содержание углерода изменяется в меньших пределах (84—87%); кислород, сера, азот входят в состав активных функциональных групп: OH, N_2H , SH, COOH. В целом, однако, элементарный состав дает лишь весьма приближенное представление о свойствах битумов, поэтому чаще пользуются групповым составом. Разделение битума на отдельные группы соединений, близких по строению и свойствам, основано на неодинаковой растворимости их в растворителях (бензоле, сероуглероде и др.), а также различной избирательной адсорбируемости силикагелем, флорицином и другими адсорбентами.

В групповой состав битума входят масла, извлекаемые растворением их в петролейном эфире или легком бензине. Масла состоят из углеводородов парафинового, нафтенового и ароматического рядов относительно несложного строения с молекулярной массой 300—600. Они имеют светло-желтый цвет и придают битуму подвижность и текучесть. Истинная плотность менее 1 г/см³. Содержание масел в битумах 35—60% (по массе). Отношение количеств С:Н характеризует степень ароматичности и составляет для группы масел 0,55—0,60.

Вторым групповым компонентом битумов являются смолы. Они состоят из углеводородов циклического и гетероциклического строения с молекулярной массой 600—1000, имеют темно-коричневый цвет, истинную плотность, равную примерно 1 г/см³. Содержат наибольшее количество сернистых, азотистых и кислородных производных углеводородов (эти соединения полярны), что придает им поверхностную активность, а битуму — улучшение адгезии к каменным материалам, которые участвуют в ИСК в качестве зернистых материалов (заполнителя). Величина С:Н составляет 0,6—0,8. Смолы хорошо растворяются в бензоле, хлороформе и представляют собой легкоплавкие, вязкопластичные вещества. Их присутствие при дает битуму эластичность, водоустойчивость. Содержание смол в битумах 20—40% (по массе).

Асфальтены — твердые неплавкие вещества с плотностью немного более 1 г/см³, их молекулярная масса составляет 1000—5000. Они растворимы в хлороформе, горячем бензоле и четыреххлористом углероде, но не растворимы в легком бензине. В асфальтенах атомное отношение С:Н составляет 0,8—1,0. Их содержание повышает температуростойкость, вязкость и твердость битумов. Обычно в битумах содержится 10—40% (по массе) асфальтенов. Под действием ультрафиолетовых лучей они становятся нерастворимыми в бензоле, переходя в карбены.

Карбены и карбоиды содержатся в основном в крекинг-битумах в количестве 1—3%. Карбены по своим свойствам и составу близки к асфальтенам, но содержат больше углерода и имеют большую плотность. Они не растворяются в горячем бензоле и четыреххлористом углероде, растворимы только в сероуглероде. Карбоиды — твердые вещества, нерастворимые в известных растворителях. С увеличением содержания карбенов и карбоидов увеличивается вязкость и хрупкость битумов. Эти твердые вещества в битумах относятся к кислород- и серосодержащим полициклическим соединениям.

Асфальтогеновые кислоты хорошо растворяются в этиловом спирте, являются полярными и выполняют функции поверхностно-активных веществ. К этой же группе относят ангидриды асфальтогеновых кислот. Общее содержание асфальтогеновых кислот и их ангидридов в битумах до 3%. Они способствуют высокой адгезии битумов к каменным материалам.

Парафины относятся к твердым метановым углеводородам, они ухудшают свойства битумов. Особенно неблагоприятное влияние оказывают крупнокристаллические парафины (снижается пластичность и увеличивается хрупкость битумов). Содержание парафинов в битумах может составлять 6—8%.

По внутреннему строению битум представляет собой сложную коллоидную систему, дисперсионной средой в которой является раствор смол в маслах, а дисперсной фазой — асфальтены, карбены и карбоиды, коллоидно-растворенные в среде до макромолекул размером 18—20 мкм. В пограничной зоне адсорбированы асфальтогеновые кислоты, плотно удерживаемые на макромолекулах асфальтенов.

Под влиянием солнечной радиации, высоких температур, кислорода воздуха групповой состав битумов изменяется за счет химического перехода масел в смолы, а смол — в асфальтены. Групповые углеводороды входят в состав битумов в различных соотношениях их масс, что, естественно, предопределяет их структуру и свойства. Структура битумов становится то типа золь, с малой вязкостью, то более плотной типа гель, с повышенной вязкостью, что зависит и от температуры битума. При нагревании или

увеличении содержания масел структура геля переходит в золь. Вязкость битумов при их нагревании быстро изменяется — падает.

Твердые битумы (типа геля) характеризуются условно глубиной проникания стандартной иглы при действии на нее груза массой 100 г в течение 5 с при температуре 25 °С или 200 г в течение 60 с при 0 °С; она выражает величину, обратную вязкости, т. е. текучесть, и определяется пенетрометром в градусах. Каждый градус означает погружение иглы на 0,1 мм. При температурах 25 °С пенетрация вязких и твердых битумов $P_{25} = 5—300$. Условная вязкость жидких битумов (типа золь) характеризуется временем истечения определенного количества битума (50 см³) через отверстие вискозиметра при одной-двух стандартных температурах, а именно: S_{25}^5 и S_{60}^5 . Здесь верхний индекс — величина диаметра (в мм) стандартного отверстия, нижний — температура испытания.

Кроме пенетрации, у вязких и твердых битумов определяют еще пластичность и температуру размягчения. Пластичность определяют по растяжимости образцов-восьмерок на специальном приборе — дуктилометре при температурах — 25 и 0 °С (для улучшенных битумов). Температура размягчения отражает переход битума из твердого или вязкопластического состояния в жидкое. Она определяется по методу «Кольца и шара». По особой методике нередко фиксируют также температуру перехода битума в хрупкое состояние (прибор Фрааса). По разности температур размягчения и хрупкости судят о качестве битумного материала: чем больше интервал этих температур (именуемый как интервал пластичности), тем выше качество. О теплоустойчивости битума судят по индексу пенетрации (ИП).

Существенной особенностью битумов является их высокая адгезия — прилипание к поверхности минеральных и органических материалов. Разработано несколько методов и приборов для определения адгезии. По визуальному методу степень прилипания битума к каменному материалу оценивается по пятибалльной шкале. Если пленка битума на поверхности гравия или щебня полностью сохранилась после кипячения в дистиллированной воде, прилипание битума отличное и оценивается 5 баллами; если пленка битума после кипячения полностью смещается с минеральных зерен и всплывает на поверхность воды, прилипание очень плохое и оценивается в 1 балл.

В зависимости от показателей основных свойств вязкие (твердые) нефтяные битумы подразделяют на марки. Битумы нефтяные (БН) вырабатывают четырех марок: БН 60/90, БН 90/130, БН 130/200, БН 200/300. Цифры дроби указывают на допустимые для данной марки пределы показателей пенетрации при 25 °С. Битумы нефтяные дорожные выпускают пяти марок: БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, БНД 130/200 и БНД 200/300. Битумы марок БНД отличаются хорошим сцеплением с каменными материалами имеют достаточно высокую пластичность при отрицательных температурах, проявляют стойкость к климатическим воздействиям.

Для изготовления кровельных и гидроизоляционных материалов применяют битумы марок БНК 45/180 (пропиточные), БНК 90/40 и БНК 90/30 (покровные). Числитель дроби указывает среднее значение показателей температуры размягчения (в °С), знаменатель — среднее значение показателей пенетрации при температуре 25 °С (табл. 10.1-10.3). Предусмотрены марки нефтяных битумов и для некоторых других технологий — при изоляции трубопроводов от коррозии (марки БНИ), для строительных целей (марки БН), для приклеивания и окраски при устройстве гидроизоляции и изготовления лаков повышенной теплостойкости (марки улучшенных битумов, полученных с помощью особой химической обработки и т. п.).

Таблица 10.1. Характеристика битумов нефтяных дорожных (БНД) (ГОСТ 22245—76)

Показатели	Нормы для марки				
	БНД— 130/200	БНД— 200/300	БНД— 90/130	БНД— «0/90	БНД— 40/60
Глубина проникания иглы, мм:					

при 25°C	201—300	131—200	91—130	61—90	40—60
при 0°C, не менее	45	35	28	20	13
Температура размягчения по «Кольцу и шару», °C, не ниже	35	39	43	47	51
Растяжимость, см, не менее:					
при 29°C	—	65	60	50	40
при 0°C	20	6	4,2	3,5	—

Таблица 10.2. Характеристика битумов нефтяных строительных (ГОСТ 6617—76)

Показатели	Нормы для марки		
	БН 50/50	БН 70/30	БН 90/10
Глубина проникания иглы при 25°C, мм	41—60	21—40	5—20
Температура размягчения по «Кольцу и шару», °C, не ниже	50	70	90
Растяжимость при 25°C, см, не менее	40	3	1

Таблица 10.3. Характеристика битумов нефтяных кровельных (ГОСТ 9548—74)

Показатели	Нормы для марки		
	БНК— 45/180	БНК— 90/40	БНК— 90/30
Глубина проникания иглы при 25°C, мм	140—300	35—45	25—5
Температура размягчения по «Кольцу и шару», °C	40—50	85—95	85—95
Температура вспышки, °C, не ниже	240	240	240

Кроме вязких (твердых) в строительстве используют жидкие битумы как подогретыми до температуры около 100°C, так и в холодном состоянии (температурой 15—20°C). Со временем жидкие битумы загустевают за счет испарения летучих фракций, окисления и других процессов. Важнейшие свойства жидких битумов: вязкость, скорость загустевания и свойства остатка после испарения летучих фракций, адгезия, температура вспышки, погодоустойчивость и др.

В зависимости от скорости загустевания жидкие битумы подразделяются на среднегустеющие (СГ), получаемые разжижением вязких дорожных битумов жидкими нефтепродуктами; медленногустеющие (МГ и МГО), получаемые из остаточных или частично окисленных нефтепродуктов или их смесей. Класс битума устанавливают по количеству испарившегося разжижителя при выдерживании образца битума в термостате или в вакуумтермостате при определенных температурах.

В зависимости от класса и вязкости жидкие битумы имеют марки: СГ 40/70, СГ 70/130, СГ 130/200, МГ 40/70, МГ 70/130, МГ 130/200, МГО 40/70, МГО 70/130, МГО 130/200.

Жидкие нефтяные битумы класса СГ готовят путем разжижения вязких битумов керосином, бензином, лигроином и др.; медленногустеющие битумы получают, применяя в качестве разжижителей масляные нефтепродукты, природные смолистые нефти, мазут и т. п. Медленногустеющие битумы могут быть природными — тяжелые смолистые нефти. При добавлении разжижителя происходит изменение дисперсной структуры вязкого битума. Некоторые разжижители могут вызвать коагуляцию дисперсной фазы битума и ухудшить его вяжущие свойства, поэтому разжижитель должен иметь требуемый фракционный состав и полярность, аналогичные вязкому битуму.

При приготовлении жидких битумов вязкие битумы нагревают до температуры 80—90°C, если применяют легкие разжижители, и до температуры 130—140°C — для тяжелых разжижителей; последние предварительно подогревают в отдельной емкости, а затем добавляют в разжижаемый битум при постоянном перемешивании смеси.

При нагревании жидких нефтяных битумов необходимо соблюдать требуемую температуру, предусмотренную нормативно-технической документацией для каждой марки, и более краткое выдерживание их при этих температурах. Требуется соблюдать также технику противопожарной безопасности. В качестве природных жидких битумов в строительстве используют тяжелые высокосмолистые нефти.

10.1.2. ДЕГТИ

Дегти — органические вязущие вещества вязкой или жидкой консистенции, получаемые как побочный продукт при сухой (деструктивной, без доступа воздуха) перегонке твердых топлив (каменного или бурого угля, торфа, сланцев, древесины). Наибольшим распространением в строительстве пользуются каменноугольные дегтевые вязущие вещества. Широко применяют также и сланцевые дегти, называемые сланцевыми битумами. Ниже рассмотрены технологии каменноугольных и сланцевых дегтей.

Производство каменноугольного дегтя. Вначале получают сырой каменноугольный деготь в процессе коксования или газификации угля, или полукоксования при выработке генераторного газа. С этой целью в коксовую печь загружают подготовленную шихту из обогащенных каменных углей разных марок. Шихту нагревают без доступа воздуха; коксование заканчивается при температуре 1100—1200°C после полного удаления из угля летучих веществ. В процессе коксования пары сырой каменноугольной смолы и аммиачной воды улавливаются в холодильниках, где происходит их конденсация. Вместе с парами в холодильниках осаждаются мельчайшие твердые частицы угля и кокса. Далее продукты конденсации направляются в дегтеотстойники. В них частично сырая смола отделяется от аммиачной воды. Выход сырой смолы или сырого дегтя составляет до 5% массы коксуемого угля.

В газовых печах (ретортах) газификация каменного угля осуществляется при температуре 1250—1300°C, выход сырой смолы при этом еще меньше, чем при коксовании.

Полукоксование шихты в печах производится при температуре 500—700°C с получением низкотемпературного сырого дегтя.

Сырой деготь содержит большое количество легколетучих и кристаллических, а также токсичных и окисляемых веществ, что приводит к резкому ухудшению его свойств во времени (старению). Поэтому его отправляют на дегтеперегонную установку. Технологическая схема дегтеперегонной установки периодического действия показана на рис. 10.3. В теплообменник 5 загружают сырой деготь, и путем подогрева отходящими парами дегтевых масел до 80—100°C он частично обезвоживается. Далее этот деготь поступает в перегонный куб 7, где при подогреве из него выделяются пары масел, которые по шлемовой трубе 6 направляются в змеевик теплообменника. В холодильнике 3 происходит полная конденсация паров дегтя, после чего дистилляты поступают в сборники 1, в которых собирают фракции, отогнанные в определенных интервалах температур. После окончания перегонки в кубе остается пек, который через сливную трубу 8 выпускают в пекотушитель 9 (пеки легко воспламеняются уже при температуре 400°C). Охлажденный до 150°C пек поступает в пеко-вую яму или в тару. В сборник из теплообменника поступает конденсат, который образуется в холодильнике 4. Далее цикл повторяется.

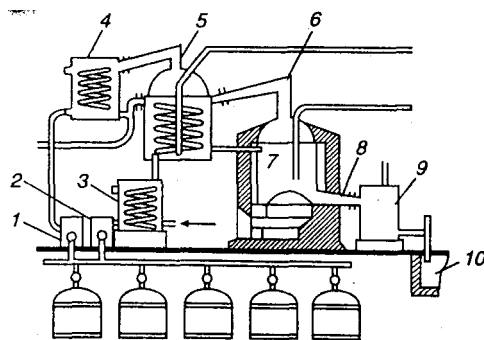


Рис. 10.3. Технологическая схема дегтеперегонной установки периодического действия:

1, 2 — сборники продуктов перегонки; 3, 4 — водяные холодильники; 5 — теплообменник-обезвоживатель; 6 — шлемовая труба; 7 — вертикальный куб; 8 — сливная труба; 9 — пекотушитель; 10 — пековая емкость

При непрерывном процессе перегонка сырого дегтя производится в вакууме. На таких установках кубы последовательно соединены трубопроводом, при этом деготь перемещается из одного куба в другой и в каждом кубе отгоняется определенная фракция. В последнем кубе собирается пек. Каменноугольные пеки выпускают двух видов: 1) среднетемпературный марок А и Б и 2) высокотемпературный (табл. 10.4).

Таблица 10.4. Технические характеристики каменноугольных пеков

Показатели	Среднетемпературный		Высокотемпературный
	А	Б	
Внешний вид	расплавленный или твердый в виде чешуек или гранул черного цвета		твердый в виде гранул или чешуек черного цвета
Температура размягчения, °С	67—75	76—83	135—150
Зольность, %, не более	0,4	0,4	0,4
Содержание воды, %, не более: в твердом	4		3
в жидком	0,5		—

Истинная плотность пеков 1,1—1,26 г/см³, температура вспышки в открытом тигле 170—190°С.

Пеки не растворимы в воде, но хорошо растворяются в скипидаре сероуглероде и хлороформе, имеют достаточную стойкость к растворам солей и кислот, более гнилостойки, чем битумы. На основе пеков изготовляют приклеивающие мастики в гидроизоляционных работах. Для получения пека с повышенной температурой размягчения проводят перегонку дегтя с рециркуляцией воздуха, при этом происходит отбор дистиллятов. Хлорирование и сульфирование пеков повышает их температуру размягчения до 140 С.

Свойства каменноугольных дегтей зависят от их состава и структуры. Основным механическим свойством дегтей является вязкость, которая быстро снижается даже при незначительных повышениях температуры. Условная вязкость дегтей характеризуется временем истечения в секундах 50 мл дегтя через отверстие диаметром 5 или 10 мм при температуре 30 или 50°С. Вязкость дегтя определяют на стандартных вискозиметрах. В зависимости от вязкости дегти подразделяют на марки: Д-1, Д-2, Д-3, Д-4, Д-5, Д-6 (табл. 10.5.). Для получения дегтя требуемой вязкости нередко сплавляют два вида дегтя разной вязкости.

Таблица 10.5. Требования к каменноугольным дегтям

Показатели	Нормы для марок					
	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4	Д-5	Д-6
Вязкость, с:						
C_{30}^5	5—70	—	—	—	—	—
C_{30}^{10}	—	5—20	21—50	51—120	121—200	—
C_{50}^{10}	—	—	—	—	—	100—80
Массовая доля воды, %, не более	3	1	1	1	1	1
Массовая доля веществ, не растворимых в толуоле, %, не более	18	20	20	20	20	20
Массовая доля фракций, %, перегоняемых до температуры, °С:						
170	3	2	1,5	1,5	1,5	1,5
270	20	20	15	15	15	10 15
300	35	30	25	25	25	20

Температура размягчения остатка после отбора фракций до 300°C, не более	45	65	65	65	65	70
Массовая доля фенола, %, не более	5	3	2	2	2	2
Массовая доля нафталина, %, не более	5	4	3	3	3	3

Как указывалось выше, дегти имеют повышенную способность к прилипанию благодаря большому количеству в их составе полярных групп веществ и фенолов. Однако фенолы токсичны, вымываются водой, поэтому их содержание ограничивают.

Биостойкость дегтей — высокая, цвет — черный, имеют специфический запах каменноугольной смолы, токсичны. Температура вспышки дегтей 150—190°C, температура воспламенения 180—270°C. Истинная плотность каменноугольных коксовых дегтей 1,1—1,3 г/см³, а газовых дегтей — 1,0—1,2 г/см³.

Низкая погодоустойчивость и старение дегтей происходят в связи с испарением летучих веществ; этому способствует также наличие в дегтях ненасыщенных высокомолекулярных углеводородов, которые окисляются и полимеризуются, и активных веществ. Со временем групповой состав дегтя изменяется, что приводит к потере им пластических свойств при пониженных температурах, увеличению хрупкости дегтевых материалов. Для установления стабильности свойств дегтя определяют его фракционный состав и проводят испытания остатка после нагревания до 300°C.

Погодоустойчивость и степень устойчивости к изменению вязкости дегтя оценивают по содержанию в нем легких, средних и тяжелых масел, которое определяется разгонкой пробы дегтя в специальном аппарате — стеклянном одношариковом дефлегматоре.

Температуру размягчения остатка, полученного после отгона фракций до 300°C, определяют так же, как и температуру размягчения битумов на приборе «Кольцо и шар».

Для определения содержания фенолов в дегтях из фракции 170—270°C, полученной при перегонке пробы дегтя, извлекают фенолы щелочью и измеряют приращение объема щелочи. Определение нафталина заключается в измерении количества осадка, выделившегося при кристаллизации фракции 170—270°C.

С целью увеличения вязкости, повышения теплоустойчивости и улучшения других свойств в каменноугольную смолу или низкомарочный деготь при температуре 180—200°C вводят серу и серосодержащие материалы. При этом происходит дегидратация углеводородов дегтя и изменяются межмолекулярные связи.

Улучшают качество дегтей введением минеральных дисперсных наполнителей в количестве до 30% (молотого известняка и доломита, каменноугольной и цементной пыли). Такие дегти называются наполненными. Их состав подбирают расчетом или

лабораторным путем. Наполненные дегти выпускают двух марок: ДН-7 вязкостью $C_{30}^{10} =$

3—70 с и ДН вязкостью $C_{50}^{10} = 70—120$ с.

Состав и структура каменноугольных дегтей и пеков. Дегти состоят из высокомолекулярных углеводородов в основном ароматического ряда и их производных, т. е. соединений углеводородов с серой, азотом и кислородом.

Дегти имеют переменный групповой состав в зависимости от сырья и технологии его переработки. Для определения группового состава деготь подвергают фракционной разгонке. В нем содержатся твердые, углистые неплавкие вещества, не растворимые в органических растворителях и называемые свободным углеродом, твердые неплавкие дегтевые смолы, растворимые только в пиридине; вязкопластичные плавкие дегтевые смолы, растворимые в бензоле и хлороформе, которые придают дегтям эластичность; жидкие дегтевые масла: легкие — с температурой кипения до 170°C, средние — 170—270°C, тяжелые — 270—300°C и антраценовые — 300—600°C; твердый остаток свыше 360°C называется пеком (в древесных дегтях — варом).

Деготь представляет собой сложную дисперсную систему, средой в которой служат масла, а дисперсной фазой — свободный углерод и твердые смолы. На поверхности частиц углерода содержатся слои молекул вязкопластичных смол, кислых и основных веществ. В зависимости от концентрации таких мицелл изменяются структура и вязкостные свойства дегтя. Структура дегтя приближается к типу суспензии, поэтому вязкость существенно зависит от концентрации твердой фазы, механических и тепловых воздействий. При пониженных температурах некоторые ароматические углеводороды, находящиеся в маслах, могут выкристаллизовываться с образованием твердого нафталина, антрацена и др., что приводит к понижению вяжущих свойств дегтя. В отличие от битумов, в дегтях имеются не только анионо-, но и катионоактивные вещества, которые способствуют более тесному физико-химическому контакту с материалами, на которых деготь образует пленки. Дегти быстрее стареют, чем битумы, что приводит к охрупчиванию ИСК, изготовленных на их основе.

В ассортименте дегтевых материалов, кроме отогнанных, получаемых на дегтеперегонных установках, имеются еще и окисленные. Они получают из отогнанных с помощью дополнительного окисления воздухом при температуре 170—200°C в кубовых аппаратах в течение 4—16 ч в зависимости от сырья и требуемой вязкости. Окисленные битумы выпускаются марок ДО-4, ДО-6, ДО-7 и ДО-8.

В строительстве наибольшее применение имеют составленные (препарированные) дегти, получаемые смешением горячего пека с антраценовым маслом или другими жидкими дегтевыми веществами — пековой смолой, тяжелым маслом и др. Пек как твердое или вязкое аморфное вещество черного цвета состоит из смолистых веществ, свободного углерода, частиц кокса и угля, антрацена, фенантрена, нафталина и масел.

К одной из разновидностей дегтевых вяжущих веществ относится сланцевый деготь. По консистенции он разделяется на вязкий и жидкий, а по генезису — побочный продукт сухой (деструктивной) перегонки горючих сланцев, точнее, их органической части — керогена. Кероген нерастворим в органических растворителях и не выплавляется при обычном нагревании сланцев. Сухая перегонка горючих сланцев осуществляется в камерных печах при температуре 500—600°C без доступа воздуха. Элементарный состав колеблется в довольно широких пределах, что является характерной особенностью дегтя: углевода 55—80%, водорода 6—10%, кислорода 7—35%, серы 1,2—11%, азота 0,2—4,5%. Групповой состав, %: масла 46—60, смолы 18—27, асфальтены 12—30.

Сланцевые дегти значительно чаще именуют битумами, поскольку их групповой состав и свойства ближе к признакам битумных вяжущих веществ. Как и нефтяные битумы, они по консистенции разделяются на вязкие и жидкие.

Вязкие битумы сланцевые характеризуются: пенетрацией при температуре 25°C в пределах 110—330°C; температурой размягчения по прибору КиШ — выше 30°C; температурой хрупкости — не более 14°C; температурой вспышки — не ниже 140°C. Они имеют марки: БСК 110/190, БСД 190/250 и БСД 250/330.

Жидкие битумы сланцевые по условной вязкости, определяемой вискозиметром, подразделяют на марки С 12/20, С 20/35, С 35/70, С 70/130, С 130/200. Они имеют температуру вспышки не ниже 130°C.

Сланцевые битумы отличаются от нефтяных меньшей тепло- и атмосферостойкостью. Процессы старения имеют в основном характер полимеризации и окисления ненасыщенных углеводородов, вымывания водорастворимых соединений и улетучивания. Битумы сланцевые применяют в дорожном строительстве, используют для приготовления эмульсий и паст, компаундированных вяжущих веществ, а также для кровельных работ. Они сравнительно легко совмещаются с нефтяными битумами и дегтевыми материалами. Опыт эксплуатации асфальтовых дорожных покрытий на основе сланцевых битумов (дегтей) показал, что перегрев каменных материалов приводит к повышению вязкости вяжущего вещества и снижению водоустойчивости и эластичности покрытия.

10.1.3. ОТВЕРДЕВАНИЕ БИТУМОВ И ДЕГТЕЙ

Отвердевание битумов и дегтей как основных органических вяжущих веществ может происходить в Объемном и пленочном состояниях. В объемном состоянии их вязкость повышается с переходом в вязкоупругое состояние в цистернах, котлах, сосудах и других емкостях; в пленочном происходит постепенное или быстрое структурирование органических вяжущих веществ в асфальтовых и дегтевых бетонах и растворах, в кровельных и гидроизоляционных материалах и изделиях, а также в других ИСК, в которых эти вещества выполняют вяжущие функции в пленочном состоянии, формируя матричную часть конгломерата.

Основной причиной изменения реологических свойств битума и дегтя в неподвижной емкости служит снижение температуры, что сопряжено с уменьшением интенсивности движения дискретных частиц в жидкой среде. В качестве дискретных частиц разной степени плотности выступают: в битумах — асфальтены с адсорбированными асфальтогеновыми кислотами, карбены и карбоиды; в дегтях — частицы свободного углерода с адсорбированными фенольными соединениями. Жидкой средой у битумов служат истинные растворы смол в маслах; у дегтей — истинный раствор масел различной молекулярной массы. Микроскопическую неоднородность обе дисперсные системы проявляют в период постепенного охлаждения, локальных сгущений молекул и их ассоциаций с переходом в сравнительно крупные макрочастицы (от 20 до 2000 А). Накопление таких частиц образует самостоятельную дисперсную фазу. И хотя частицы ее еще нельзя обнаружить с помощью обычного микроскопа, но фаза в целом уже обладает реальной и высокоразвитой поверхностью. Поверхность имеет большую энергетическую активность и адсорбционную способность, в частности к поглощению из системы поверхностно-активных веществ.

Развивается также процесс спонтанного уплотнения частиц при охлаждении битума и дегтя в емкостях с эффектом структурирования. Следует отметить, что такой процесс напоминает образование центров кристаллизации (и вообще центров выделения новой фазы) в растворах неорганических солей. В органических системах жидкая среда является основным носителем потенциальных центров выделения новой фазы. При охлаждении она поддерживает непрерывный процесс структурообразования и формирования частиц различной дисперсности и плотности. В их центре сосредотачиваются твердые и лиофильные асфальтены в битумах или частицы свободного углерода в дегтях. При высокой концентрации мицелл возможно их непосредственное контактирование с переходом структуры битума в олеогель. Переход структуры битума из типа золь в тип гель может быть не только при понижении температуры, но и при возрастании количества асфальтенов больше 25—30% по массе. Так же влияет содержание парафина в битуме или нафталина в дегте, выделяющиеся кристаллы которых тем крупнее, чем медленнее понижалась температура вяжущих веществ. Битум в состоянии структуры гель представляет собой как бы единую мицеллярную пространственную сетку, в промежутках которой находится иммобилизованная и свободная жидкие среды. Происходит своеобразная инверсия фаз: жидкая среда становится в этой структуре дискретной фазой, а твердая — континуальной, непрерывной средой. Гелеобразный характер битума проявляется в наличии температурного интервала плавления и синерезиса, в повышенной упругости и эластичности.

Аналогичные изменения в структуре происходят при изменении температуры дегтя в емкостях, но только при менее развитой поверхности частиц твердой фазы. В результате деготь отличается отсутствием гелеобразного состояния и меньшей вязкостью, чем битумы. Исключение могут составить сланцевые дегти.

Битум и деготь переходят из объемного в пленочное состояние с помощью порошкообразного или зернистого минерального материала. Исходная вязкость этих вяжущих в пленочном состоянии всегда несколько выше, так как часть пленочного

вещества находится в адсорбционно-сольватированном состоянии. С понижением температуры возникают центры сосредоточения (микрозародыши) мицелл. Их рост и увеличение концентрации переводит жидкостные пленки в состояние повышенной вязкости и к тенденции упорядочения расположения молекул и мицелл. Постепенно или быстро пленки становятся вязкоупругими или твердыми. В исследованиях было установлено, что их хрупкость (появление трещин на пленке, нанесенной на поверхность металлической пластинки, при изгибе) соответствует примерно температуре, когда вязкость вяжущего вещества (битума) равна $4 \cdot 10^8$ Па·с. Эта температура хрупкости возрастает с увеличением толщины пленки, снижением скорости охлаждения, увеличением продолжительности и числа циклов воздействия климатических (атмосферных) факторов. При относительно медленном отвердевании пленок вяжущего вещества возрастают упорядоченность и ориентированность микрочастиц, возможна кристаллизация, например парафиновых углеводородов в битумах, нафталиновых — в дегтях.

При использовании жидких и разжиженных битумов возникает дополнительный процесс испарения легких фракций, что также относится к одному из факторов их отвердевания. В эксплуатационный период возможны процессы полимеризации и синерезиса битума или сублимация некоторых фракций дегтя, что также связано с ростом вязкости и вероятностью охрупчивания ИСК_н на основе органических вяжущих веществ. В результате этих процессов уменьшается содержание жидкой среды, увеличивается количество ориентированных моно- и полисоев, снижается фазовое отношение, под которым, как уже отмечалось, условно понимается величина отношения массы жидкой среды к массе твердой фазы, что типично и для других вяжущих веществ, выполняющих функции матричной части конгломерата.

10.1.4. МИНЕРАЛЬНЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ В КАЧЕСТВЕ АСФАЛЬТИРУЮЩИХ ДОБАВОК

Минеральный порошок получают путем измельчения известняков и доломитов, известняковых или доломитовых асфальтовых пород и основных доменных шлаков. Породы камня используются с прочностью на сжатие не менее 20 МПа. Одной из основных качественных характеристик порошка служит тонкость помола. Необходимо, чтобы частицы мельче 0,071 мм содержались в порошке не менее 70% по массе (при мокром расसेве). Через сито с отверстиями 1,25 мм порошок должен проходить полностью, а с отверстиями 0,315 мм — не менее 90% от массы порошка. Среди других требований к качеству минерального порошка, используемого в производстве асфальтового бетона, следует выделить пористость в уплотненном состоянии порошка под нагрузкой 30,0 МПа — не более 40% по объему. Она всегда возрастает с увеличением однородности частиц. Коэффициент водостойкости образцов из смеси порошка с битумом — не менее 0,7—0,8. Показатель битумоемкости (ПБ) — не более 100 г.

Определяют его по формуле: $ПБ = \frac{\rho_{мп} \cdot 15}{Q} \cdot 100$, где $\rho_{мп}$ — истинная плотность

порошка, г/см³; Q — количество порошка, г.

К важным показателям, влияющим на водостойкость, морозостойкость, долговечность и другие характеристики бинарной дисперсной системы, относят коэффициент гидрофильноеTM порошка. Определяют его величину по формуле: $K = V_B/V_K$ (для фракции 1,25 мм), где V_B и V_K — объемы, которые составляют навески минерального порошка после набухания в течение 3-х суток соответственно в воде и керосине. Величина K должна быть не выше 1. Кроме того, гидрофильность может оцениваться по скорости капиллярного насыщения водой, которая должна быть не более 0,75—3,0 мм/мин, или по высоте подъема жидкости по трубке с порошком с определением краевого угла смачивания и др.

В заводских условиях минеральные порошки должны находиться в условиях, предохраняющих их от увлажнения и слеживаемости, так как они используются в сухом, рыхлом (без комков) состоянии. В них ограничивается содержание глинистых частиц пределом до 1,5%, определяемое по количеству оксидов железа и алюминия. Недопустимы и другие загрязняющие примеси.

В качестве минеральных порошков допускается использовать другие породы, не содержащие глинистых примесей, а также основные доменные шлаки.

10.1.5. ФОРМИРОВАНИЕ АСФАЛЬТОВОГО ВЯЖУЩЕГО ВЕЩЕСТВА

При взаимодействии битумов и минеральных порошков типа кальцита, доломита, известняка с высоким положительным потенциалом и большим количеством адсорбционных центров в виде катионов Ca^{2+} или Mg^{2+} происходит интенсивный перевод битума из объемного состояния в состояние диффузно-сольватированных оболочек. При таком структурировании образуются сравнительно прочные физические и хемосорбционные связи — своеобразные «анкерные» контакты, крепко удерживающие битумные пленки на поверхности частиц порошков. При применении этих порошков в асфальтовых бетонах целесообразно использовать битум высокой активности (см. 8.4).

При взаимодействии битумов и минеральных порошков типа кварца, каолинита, кремния, гранита и других аналогичных адсорбентов с высоким потенциалом отрицательного знака в виде ионов кислорода O^{2-} происходит наименьшее снижение полярности фаз в битумо-минеральной системе. Порошки этой группы при контакте с битумом вызывают отрицательную адсорбцию. Их роль ограничивается механическим заполнением микрополостей битумной пространственной сетки. Пленки битума очень слабо удерживаются на поверхности частиц порошка единичными «анкерами».

Другие разновидности порошков с пониженным потенциалом отрицательного знака (типа полевых шпатов, слюды, роговой обманки и т. п.) или с преимущественно нейтральной поверхностью частиц (типа талька, графита) занимают по активности при взаимодействии с битумом как бы промежуточные положения.

К моменту выхода из смесительного аппарата перемешанного битумно-минерального вещества в основном заканчиваются процессы образования адсорбционных монослоев и диффузно-сольватированных оболочек, т. е. завершается микроструктурообразование. Оптимум содержания битума, характеризующийся сплошностью пленки минимальной толщины при минимальном количестве объемного битума в бинарной системе асфальтового вяжущего вещества, устанавливается при проектировании оптимального состава.

10.2. ЗАПОЛНЯЮЩИЕ КОМПОНЕНТЫ В ИСК НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Для производства асфальтового бетона используются крупно- и мелкозернистые заполнители, т. е. щебень или гравий и песок.

Щебень изготавливают из прочных морозостойких невыветрелых горных пород магматического, осадочного или метаморфического происхождения, а также некоторых разновидностей атмосферных и прочных шлаков. Чаще других пород употребляют граниты, габбро, диабаз, базальт, андезиты, гнейс, трахиты, известняки и доломиты. Предпочтительнее применять изверженные основные породы, а из шлаков — доменные и цветной металлургии, если последние не вызывают экологических сомнений в их качестве и составе. Не применяются горные породы выветрелые и затронутые выветриванием, со значительным содержанием глинистых примесей — мергели и мергелистые известняки, глинистые песчаники и глинистые сланцы. В щебне не допускается глинистых и пылеватых фракций свыше 2% по массе, тем более комков глины, суглинка и других загрязняющих веществ. Ограничивается применение метаморфических пород, так как кварцит нуждается в добавлении извести, цемента или других активизаторов, без которых он показывает слабое сцепление с битумом, а гнейсы и сланцы дают при дроблении в щебень повышенное количество плоской щебенки (лещадки), мрамор — дорогостоящий сырьевой материал, используемый в декоративном строительстве. Из осадочных пород распространены в производстве асфальтового бетона гравийные материалы в дробленном состоянии, из скальных пород — известняк.

Горные породы магматического и метаморфического происхождения принимаются с пределом прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии не менее 100 МПа, а осадочные породы и доменные шлаки — не менее 80 МПа. Для нижнего слоя дорожных покрытий требования к прочности камня снижаются на 20—25%. Важно, чтобы щебень был однородным по прочности и содержал щебенку пластинчатых (лещадки) и игольчатых (пальцы) с отношением взаимно перпендикулярных измерений больше 2 не более 15% по массе для верхнего и 25% — для нижнего слоев асфальтового бетона в покрытии.

Независимо от происхождения горной породы щебень из нее должен выдерживать не менее 50 циклов испытания на морозостойкость для верхнего и 25 — для нижнего слоев покрытия, причем потеря в массе допускается соответственно не более 5 и 10%. Щебень должен быть по возможности кубической формы, что зависит не только от структуры и сложения пород, но и от режима дробления камня. Рекомендуются двух- или трехступенчатое дробление с завершающим пропуском материала через щековую дробилку с шириной щели, равной максимальному размеру щебня. Крупность щебня обычно находится в пределах от 3—5 до 40 мм; для верхнего слоя покрытия она ограничивается более узким интервалом фракций.

Гравий, как правило, неоднороден по минералогическому составу и вследствие гладкой поверхности или утраты своей свежести дает слабое сцепление с асфальтовым вяжущим веществом. Поэтому принято не менее 50% гравия дробить перед применением его в составе асфальтобетона. Кремнистых частиц в щебне, полученном дроблением гравия, должно содержаться не более 25%, а зерен слабых пород — не более 10% по массе.

В целях обеспечения однородного гранулометрического состава щебень или дробленый гравий при хранении сортируется по фракциям: 20—40; 10—20; 5(3)—10 мм.

В соответствии с теорией ИСК допускается понижать предел прочности камня для заполнителя в асфальтовом бетоне. Минимальный уровень ее зависит от расчетной прочности асфальтового вяжущего вещества оптимальной структуры (R') при Б*/П, (где Б — количество битума, П — количество минерального порошка по массе), которая составляет верхний предел прочности камня. Нижний ее предел устанавливают по реальному отношению Б/П в асфальтобетоне. И тогда требуется тщательная проверка

асфальтового бетона на полный комплекс показателей его физико-механических свойств. Переход к низкопрочным породам камня связан не с кажущимся упрочнением камня под влиянием органического вяжущего вещества, а со снижением внутреннего напряжения (релаксацией) в пленках битума или прослойках асфальтового вяжущего вещества. На щебень передаются пониженные напряжения по сравнению с реально приложенными. По этой причине при низкой прочности камня всегда предпочтительнее асфальтовые бетоны порфировой оптимальной структуры, когда асфальтовяжущее вещество особенно рельефно выступает как матричная часть в виде каркаса.

Песок применяют природный и искусственного дробления; из природных песков — горные, речные, морские, озерные и др. Всегда желательно использовать пески с более остроугольными частицами, поэтому чаще — горные, предварительно разделенные по фракциям, а затем получаемые смешением отдельных фракций в определенных соотношениях (по массе), найденных опытным путем. Пески разделяют на две фракции: крупную и мелкую. За граничную фракцию при разделении песка принимается либо 1,25 мм, либо 0,63 мм в зависимости от крупности этого материала. Модуль крупности песка должен быть по возможности выше 2,5; содержание зерен крупнее 0,63 мм — не менее 50%. Но могут использоваться пески и средней крупности с модулем крупности 2,5—2,0 с содержанием зерен крупнее 0,63 мм в количестве 35—50% по массе.

Дробленый песок получают из неветрелых и, по возможности, некарбонатных горных пород, или кристаллических металлургических шлаков, имеющих прочность не ниже прочности щебня, применяемого в асфальтовом бетоне. В дробленном песке рекомендуется иметь не менее 25% по массе фракции 0,63—2 мм, что регулируется добавлением высевок от отходов камнедробления. В процессе проектирования оптимального состава асфальтового бетона может быть обосновано применение некоторой доли мелких песков с модулем крупности, меньшим 2,0. Максимальный размер зерен песка 3 или 5 мм. Гранулометрический состав песков определяют просеиванием через сита с размером отверстий 5; 2,5; 1,25; 0,63; 0,30; 0,14 мм.

Сквозь сито с отверстиями 0,14 мм (сито № 014) должно проходить не более 15% принятой пробы. В песке не допускается комков глины, суглинков, а количество пылевидных, глинистых и илистых примесей допускается не более 3% от массы природного песка и не более 5% от массы дробленого песка. Эти требования стандарта проверяют методами отмучивания песка в воде.

Качество песков, особенно мелких, повышают предварительной физико-химической активацией. С этой целью производят механическое перемешивание песка с известью, вносимой в количестве 2,5—5% по массе. Такая операция неизбежно сопровождается освежением частиц песка без заметного их доизмельчения. Использование активированного песка, по данным Л.Б. Гезенцева, особенно целесообразно при производстве мелкозернистого (песчаного) асфальтового бетона.

В процессе перемешивания компонентов иногда вводят поверхностно-активные добавки в количестве 0,2—0,5% (редко до 1,0%) от массы минерального материала. Добавки могут быть: анионоактивными веществами — ферролигносульфонат, нафтенаты меди или алюминия; катионоактивными веществами — жирные высшие амины, четырехзамещенные соли аммония, катонин и др.

10.3. ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ ИСК НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

10.3.1. АСФАЛЬТОВЫЕ БЕТОНЫ

Асфальтовый бетон (асфальтобетон) — строительный материал, получаемый в результате отвердевания уплотненной рационально подобранной смеси, состоящей из асфальтового вяжущего вещества и заполняющих компонентов. При отсутствии в смеси крупного заполнителя — щебня или гравия — получаемый строительный конгломерат именуется песчаным асфальтом или асфальтовым раствором. Асфальтовые бетоны и растворы используют в строительстве при возведении магистральных, городских, аэродромных, дорожных, кровельных и других покрытий, гидротехнических, мостовых, промышленных, жилищно-гражданских и иных зданий и сооружений. В зависимости от температуры укладки асфальтобетонной массы различают асфальтобетоны горячие, теплые и холодные. Соответственно используют битумные материалы более вязкие при горячем асфальтобетоне, более мягкие с повышенной пенетрацией — при теплом и жидкие, высокоподвижные битумы или битумные эмульсии — при холодном асфальтобетоне. Горячие и теплые асфальтобетоны подразделяют на плотные с остаточной пористостью от 2 до 7% и пористые — для нижних слоев покрытий и основания — с пористостью 7—12% и высокопористые с пористостью 12—18%.

По технологическому признаку асфальтобетонной массы в процессе ее укладки и уплотнения асфальтобетоны и растворы могут быть жесткими, пластичными и литыми. Для уплотнения жестких и пластичных масс используют тяжелые и средние катки; литую асфальтобетонную массу уплотняют специальными валками, легкими катками или приглаживанием укладочными машинами. С увеличением пластичности массы, определяемой на приборе удобообрабатываемости конструкции И.А. Рыбьева (рис. 10.4), снижается расход энергии, затрачиваемой на уплотнение смеси. Однако появляется тенденция к понижению прочности готового покрытия, возрастает способность его к пластическим деформациям, особенно при нарушенной оптимальной структуре асфальтобетона.

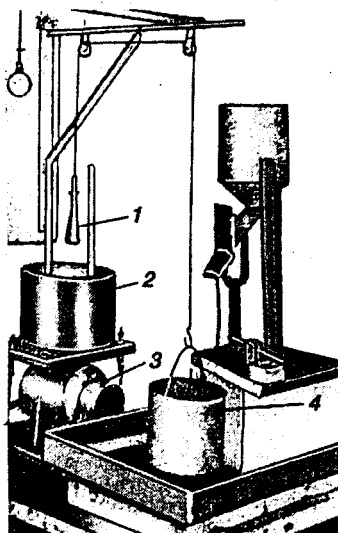


Рис. 10.4. Прибор для определения удобообрабатываемости асфальтобетонной массы (конструкция И.А. Рыбьева): 1 — конус; 2 — форма с испытуемой массой; 3 — вибратор; 4 — насыпной груз

Производство асфальтобетонной массы осуществляется на специальных заводах: стационарных и временных. Стационарный асфальтобетонный завод (АБЗ) выпускает массу в больших количествах и предназначен для строительства асфальтобетонных

покрытий на крупных и густо сконцентрированных строительных объектах, работы на которых выполняют в течение нескольких лет, например АБЗ для строительства городских дорожных покрытий. Временные АБЗ предназначены для обслуживания асфальтобетонной массой небольших объектов или крупных, но сильно растянутых в одном направлении, — магистральных автомобильных дорог и др.

Заводы по производству горячей (она является основной продукцией заводов) асфальтобетонной массы относятся к высокомеханизированным предприятиям. На современных заводах достигнута не только полная механизация, но и автоматизация основных технологических операций. В состав завода входят: смесительный цех, машины и оборудование которого предназначены для приготовления асфальтобетонной массы, дробильно-сортировочный цех для изготовления щебня и его фракционирования, помольный цех для изготовления минерального порошка, цех битумного хозяйства, энергосиловое и паросиловое отделения, складское хозяйство, ремонтно-механические мастерские и лаборатория при отделе технического контроля качества. Современные заводы, в целях избежания излишней запыленности территории, ориентируются на централизованное снабжение их материалами с каменно-заготовительных и нефтяных баз. Основная операция технологии — смешение исходных и подготовленных материалов, принимаемых в определенных количествах по проектному составу. Температура выпускаемой из смесительного аппарата массы 150—180°С или ниже у теплых и холодных масс. На рис. 10.5 показана технологическая схема механической (смесительной) установки ДС-84-2. Иногда в состав асфальтобетонной массы одновременно с битумом вводят поверхностно-активную добавку, дозируемую с помощью специального дозатора.

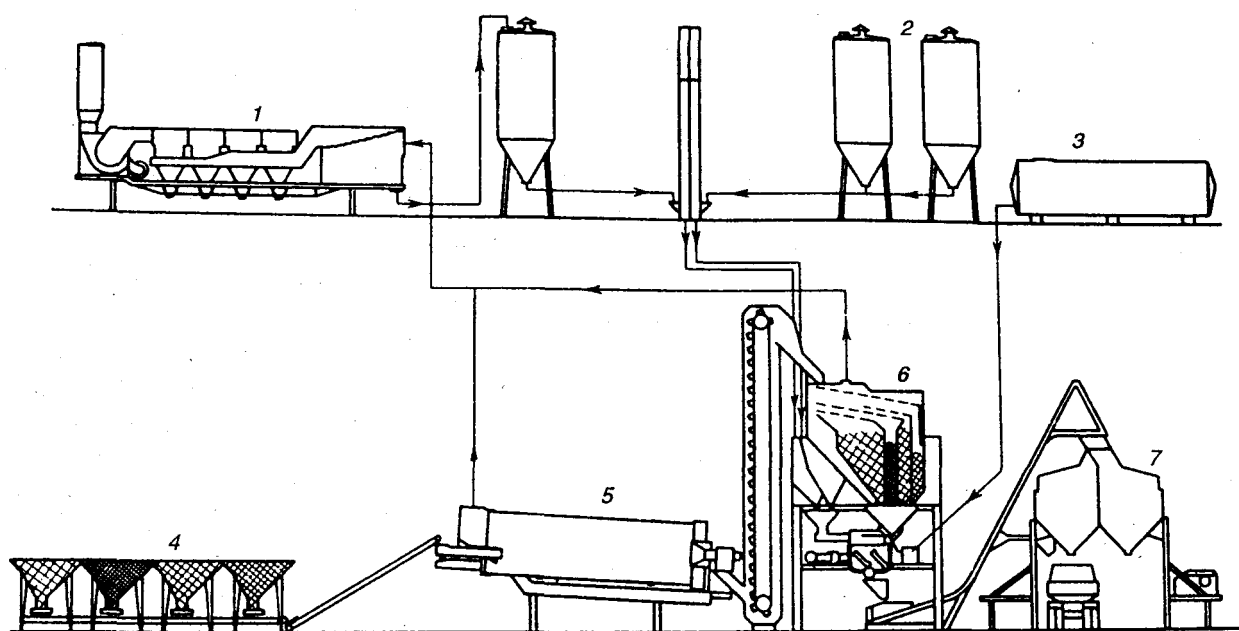


Рис. 10.5. Технологическая схема производства асфальтобетонной массы:

1 — агрегат пылеулавливания; 2 — агрегат минерального порошка; 3 — битумоплавильный агрегат; 4 — агрегат питания; 5 — сушильный агрегат; 6 — смесительный агрегат; 7 — накопительный бункер

Наиболее часто используют лопастные смесители. Быстрое перемешивание в смесителях этого типа достигается при турбулентно-вращательном движении массы за счет повышенной частоты вращения валов лопастей мешалки — до 200 об/мин вместо обычных 70—80 об/мин при производительности от 50 до 120 т/ч. Облегчает и ускоряет перемешивание песчаной асфальтобетонной массы предварительное активирование минерального порошка или введение активных добавок непосредственно в смеситель в период перемешивания. Вследствие большого количества кварцевого песка в массе

благоприятное влияние приносит добавление извести-пушонки в количестве 3—4% массы минерального порошка. Чтобы не остудить асфальтобетонную массу в пути следования к месту ее укладки, особенно в холодную и ветреную погоду или при большой дальности перевозки (более 20 км), кузов автомобиля-самосвала рекомендуется покрывать брезентом, матами, деревянными щитами или оборудовать двойными стенками для обогрева выхлопными газами. Температуру массы, прибывшей на строительный объект, контролируют не менее чем в трех точках кузова на глубине 10—15 см от поверхности.

Укладывают горячую массу механическими укладчиками, а при устройстве покрытий на большой площади или при большой ширине проезжей части (покрытия) — двумя или более асфальтоукладчиками одновременно. Чем выше температура воздуха и лучше участок защищен от ветра, тем больше длина укладываемой полосы. Так, например, при температуре более +25°C и хорошей защите от ветра длина полос составляет 100—200 м, при +5—10°C она составляет 25—60 м. Самый распространенный способ уплотнения распределенной горячей массы при больших масштабах строительства дорожных и аэродромных покрытий — укатка катками (статического действия, вибрационными, пневмоколесными), а в помещениях — площадочными вибраторами. Первичное уплотнение уложенного слоя производится трамбующим брусом асфальтоукладчика. Монолитный асфальтобетон в покрытии должен удовлетворять определенным техническим требованиям.

Отвердевший и готовый к эксплуатации в покрытиях горячий асфальтобетон характеризуется, подобно другим ИСК, своей структурой и свойствами.

Структура асфальтобетона (рис. 10.6) состоит из заполняющей смеси щебня (или гравия) и песка, скрепленной в монолит матричным асфальтовязующим веществом. Микроструктура вяжущей части характеризуется непрерывной пространственной сеткой связующего вещества (битума) и дискретными частицами минерального порошка, выполняющего роль асфальтирующей добавки. Структура асфальтобетона, как и других ИСК, включает также поры и контактные зоны. В зависимости от соотношения масс составляющих материалов асфальтовый бетон может иметь порфировую, контактную и законттактную структуры, каждая из которых при высоком качестве этого материала должна быть оптимальной. Последняя естественно отражает своеобразие принятых технологических параметров, режимов изготовления этой продукции при принятых исходных материалах.

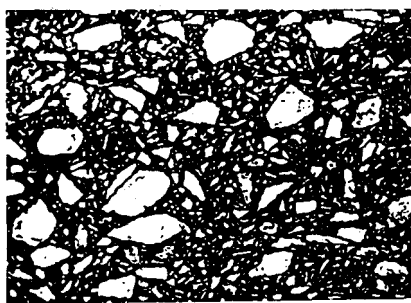


Рис. 10.6. Конгломератная структура асфальтового бетона

В теории ИСК предпочтение отдается общему методу проектирования состава асфальтобетона. Он обеспечивает получение необходимого материала не только с заданными показателями свойств, но и с их экстремальными числовыми значениями. Приходится учитывать, что реальные свойства асфальтобетона не остаются постоянными, так как внешние условия могут быстро изменяться, а вместе с ними должны изменяться и свойства покрытия из асфальтового бетона. При обычной температуре (20—25°C) четко проявляются упруго- и эластичновязкие его свойства, при повышенных температурах — вязкопластические, а при пониженных, отрицательных температурах асфальтобетон становится упругохрупким телом. Но он чувствительно реагирует не только на колебания

температуры (T°), но также на изменение скорости (v) приложения механических усилий (нагрузки) или скорости деформирования. Чем выше значения v , тем при более высоких напряжениях разрушается асфальтобетон. Обе зависимости отражены в обобщенной формуле (10.1) прочности этого материала, которая адекватна (3.12) в теории ИСК:

$$R_{T_2 v_2} = R_{T_1 v_1}^* \cdot \left(\frac{\delta^*}{\delta} \right)^n \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^p \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k. \quad (10.1)$$

Однако прочность этого конгломерата оптимальной структуры зависит как от концентрации (Б/П), что выражено в формуле (10.1) в виде симплекса $\left(\frac{\delta^*}{\delta} \right)$, так и от

количества этого вяжущего вещества, т. е. от Б+П в процентах от общей массы асфальтобетона или в долях единицы. Эта зависимость наиболее ярко проявляется в пространственной системе координат $хуз$. При оптимальной структуре, подобно другим конгломератам, прочность асфальтобетона в этой координатной системе на плоскости $у—z$ равна:

$$R_{a\bar{b}} = \frac{R_{a\bar{b}}^*}{\left(\frac{100}{B + П} \right)^m}, \quad (10.2)$$

а общая формула — после объединения полученных зависимостей на плоскостях $х—у$ и $у—z$

$$R_{a\bar{b}} = \frac{k_{П} \cdot R^*}{\sqrt{\left(\frac{B / П}{B^* / П} \right)^n \cdot \left(\frac{100}{B + П} \right)^m}}. \quad (10.3)$$

В формуле (10.3) показатели степени пит зависят от качества заполнителей и их смеси (песок + щебень). Величина пористости при плотных оптимальных структурах составляет 1—3%, а $k_{П}$ принимается обычно равным единице.

Для перехода к другим T° и v необходимо при пересчете исходить из формулы (10.1). Битум модифицированный, т. е. с добавками (каучуком, резиной, полимерами и пр.), обозначается в этих формулах $Б_{мд}$.

В производственных работах обычно механическую прочность асфальтобетона характеризуют пределом прочности при сжатии стандартных образцов, испытанных при заданных температуре и скорости приложения нагрузки. При одноосном сжатии предел прочности асфальтобетона определяют на цилиндрических образцах, размерами (диаметр и высота) 50,5x50,5 или 71,4x71,4 мм (в зависимости от крупности минерального заполнителя). Испытания проводят при температурах 20, 50, 0°C и скорости приложения нагрузки, равной 3 мм/мин.

При температуре 20°C предел прочности при сжатии асфальтобетона составляет около 2,5 МПа, а при растяжении — в 6—8 раз меньше. С понижением температуры предел прочности при сжатии возрастает (до 15—20 МПа при -15°C), а с повышением — снижается (до 1,0—1,2 МПа при +50°C).

Из других технических характеристик следует отметить износо-и водостойкость. Износостойкость определяют по потере массы образцов, испытываемых на кругах истирания или в барабанах (с определением износа). Горячий асфальтобетон в дорожных покрытиях изнашивается в пределах 0,2—1,5 мм в год. Водостойкость характеризуют величиной набухания и коэффициентом водостойкости, равным отношению пределов прочности при сжатии образцов в водонасыщенном и сухом состояниях при температуре

20°C. Он должен быть в пределах 0,6—0,9; величина набухания в воде не более 0,5% (по объему).

10.3.2. РАЗНОВИДНОСТИ АСФАЛЬТОВЫХ БЕТОНОВ

К разновидностям асфальтобетона относятся теплый и холодный. Специфическими особенностями обладают еще две других разновидности горячего асфальтобетона — литой и цветной. Более редким в строительстве является дегтебетон.

Теплый асфальтобетон используют при строительстве дорожных покрытий капитального типа и для устройства нижних слоев в покрытиях.

Для приготовления теплого асфальтобетона используют вязкие нефтебитумы марок БНД 200/300 и БНД 130/200 или жидкие битумы; известняковый порошок более тонкого помола, чем в горячих смесях; щебень и искусственный песок, получаемые дроблением основных пород, — габбровых или диабазовых; прочные шлаки. Составы теплого асфальтобетона проектируют общим методом, используемым в теории искусственных строительных конгломератов. Температура готовой теплой массы при ее выходе из смесителя должна быть 90—130°C в зависимости от исходной вязкости битума. Допустимые пределы температур массы при ее уплотнении в покрытии: нижний — 50°C при работах в теплую погоду и при марке битума СГ 70/130; верхний — 100°C при работах в холодную погоду и при марке битума СГ 130/200. Уплотнение производят легкими и тяжелыми (12т) катками; при холодной погоде рекомендуется уплотнять массу сразу же после ее укладки в покрытие, чтобы не остудить массу и не потерять ее удобообрабатываемость. Толщину рыхлого слоя назначают на 15—20% больше проектной толщины покрытия, что регулируется положением выравнивающей плиты укладчика.

Холодный асфальтобетон (холодный асфальт) содержит жидкий или разжиженный вязкий битум, что позволяет укладывать массу холодного асфальта при температуре окружающего воздуха. Могут использоваться также битумные эмульсии.

Приготовление холодного асфальта осуществляется в горячем и холодном состояниях. При приготовлении массы в горячем состоянии применяют жидкий или разжиженный битум, в холодном — битумную эмульсию. Более распространен в строительстве холодный асфальт на основе жидкого или разжиженного битума. Его применяют для создания верхних слоев дорожных покрытий и при производстве ремонтных работ, в частности, при восстановлении сильно износившихся покрытий. Если холодный асфальт употребляется в строительных работах непосредственно после его изготовления на АБЗ, то укладку массы предпочтительнее производить еще в теплом состоянии. В этом случае раскладка упрощается, слой массы ложится компактнее, а при уплотнении слоя быстрее формируется монолитное покрытие. При работах во влажную погоду используют холодный асфальт, приготовленный на битумной эмульсии.

Отвердевание монолитного слоя связано не в малой степени с испарением растворителя из разжиженного вязкого битума или легких фракций — из жидкого. Поэтому слишком значительная его уплотненность в первый период эксплуатации дорожного покрытия может принести вред. Рекомендуется не допускать высокой грузонапряженности при движении автотранспорта, так же как нельзя допускать и слишком слабой интенсивности движения транспорта, поскольку окончательное формирование покрытия происходит именно под действием этого движения.

Холодный асфальт может длительное время оставаться в рыхлом состоянии в складских условиях (до 8—10 месяцев). Поэтому холодную асфальтобетонную массу обычно готовят в зимнее время года с тем, чтобы ее раскладку в покрытие произвести с наступлением весны. Зимняя заготовка массы позволяет работать АБЗ практически в течение полного года, тогда как при производстве только одной горячей массы оборудование завода в зимний период простаивает или работает с низкой производительностью. При чрезмерно длительном хранении рыхлая масса холодного асфальта постепенно слеживается, образуются комочки или даже глыбы. Тогда использовать массу становится затруднительным, требуется предварительное рыхление

ее. Однако механическое рыхление ухудшает качество массы вследствие обнажения отдельных частиц, покрытых пленкой битума. Слеживаемость холодного асфальта при длительном хранении уменьшают, добавляя на последней стадии перемешивания массы ССБ, хлорное железо, водный раствор соапсто-ка и некоторые другие специальные вещества (добавки) в количестве до 2—3%. Эти же вещества способствуют лучшему сцеплению битума с поверхностью не полностью просушенного минерального материала. Холодный асфальт готовят с применением щебня из морозостойких карбонатных пород (известняков, доломитов) и доменных шлаков с пределом прочности при сжатии не менее 80 МПа, а при использовании изверженных и метаморфических пород — не менее 100 МПа. Чтобы покрытие не становилось скользким при его эксплуатации, к известняковому щебню принято добавлять до 30% мелкого (8—10 мм) гранитного или получаемого из других изверженных пород (диабазы, базальта) щебня или искусственного дробленого песка из тех же пород камня. Песок должен быть чистым, однородным, морозостойким, без органических примесей или глинистых частиц, способных набухать в воде. Кроме щебня и песка в состав холодного асфальта входит минеральный (известняковый) порошок для повышения вязкости и клеящей способности разжиженного или жидкого битума. При тонких пленках битума слеживаемость массы меньше и прочность плотного покрытия выше. При выборе вяжущего учитывают, что чем холоднее погодные условия, длительнее срок хранения массы, ниже прочность камня, тем вяжущее вещество должно быть более жидким. Наиболее распространенными вязкостями являются 120—180 с, определяемые по стандартному вискозиметру (при отверстии 5 мм и температуре 60°C). Такая вязкость соответствует маркам СГ 130/200, СГ 70/130 и МГ 130/200, МГ 70/130. При использовании битумной эмульсии рекомендуется средняя скорость ее распада при содержании в ней вяжущего вещества в пределах 50—60% по массе. В загородных условиях допускается применять дегтевые эмульсии.

Доля вяжущего вещества в составе холодного асфальта устанавливается проектированием оптимального состава, но обычно находится в пределах 6—8% для песчаного и 5—7% для мелкозернистого. Качество холодного асфальта в покрытиях характеризуется его прочностью при сжатии в сухом и водонасыщенном состояниях при 20°C соответственно 1,5—2,0 и 1,0—1,5 МПа, коэффициентом водостойчивости не менее 0,6—0,8 и некоторыми другими показателями свойств, указываемыми в ТУ. В целом следует отметить, что эта разновидность асфальтового бетона изготавливается и применяется пока в весьма ограниченных размерах, но покрытия из него несомненно относятся к перспективным.

Литой асфальтовый бетон (литой асфальт) выделяется из других горячих аналогов тем, что все межзерновые поры в нем заполнены асфальтовым вяжущим веществом. При этом отношение Б/П несколько больше, чем в вяжущем веществе обычного (пластичного) асфальтобетона. После укладки массы и ее уплотнения в монолите практически отсутствуют остаточные поры и пустоты, поэтому покрытия из него водонепроницаемые.

Преимущество литого асфальта состоит в том, что работы по его укладке можно производить при сравнительно низких температурах (до -10°C) воздуха. Не требуется также, как уже отмечалось, продолжительного уплотнения массы катками или трамбования при ямочном ремонте. Достаточно прикатать его легкими (0,5—1,5 т) катками или уплотнить вибробрусом асфальтоукладчика. Преимуществом покрытий из литого асфальта является также их относительно высокая долговечность, износостойкость и шероховатость. Последняя достигается покрытию либо распределением по поверхности сухого песка высевок или первых фракций мелкого щебня (5—8 мм), лучше предварительно очерненных битумом (1—1,2%), и последующей их прикаткой, либо устройством тонкослойного покрытия толщиной 0,8—1,5 см из специально подготовленной смеси. В некоторых странах шероховатость достигают применением катков с рифлеными вальцами. Литой асфальтобетон не лишен, однако, и некоторых недостатков: податливостью к сдвиговым деформациям в жаркое летнее время и

склонностью к трещинообразованию от неравномерных тепловых напряжений в период отрицательных температур воздуха. В последние годы эти традиционные недостатки были резко ослаблены за счет привлечения к проектированию оптимальных составов общей методики их расчета, излагаемой в теории ИСК, и устройства покрытий способом вибролитья¹. В получаемых составах литого асфальта содержится минеральных частиц крупнее 5 мм 50—55%, асфальтвяжущего вещества (Б+П) 20—25% с отношением Б/П, равным 0,46—0,55, причем порошок содержит 100% частиц мельче 0,071 мм. Слой уложенной массы не требует дополнительного уплотнения после вибрационного приглаживания его брусом асфальтоукладчика. С понижением температуры покрытия с 200°С до атмосферной литой асфальт в покрытии отвердевает и пригоден к эксплуатации. Достоинства покрытий из вибролитых смесей отмечены при их укладке на дорогах высоких категорий, мостах, путепроводах, эстакадах и взлетно-посадочных полосах аэродромов. Строительный сезон по их устройству может быть расширен за счет использования универсальных термосов-миксеров грузоподъемностью от 8,5 до 16 т.

По технологии вибролитья используют подогретые зернистые минеральные материалы температурой 280—300°С, если порошок поступает холодным; температуру нагрева их снижают на 12—14%, если порошок в мешалку подается подогретым до температуры 120—140°С. Битум подогревают до температуры 150—170°С. Температура смеси должна быть 190—200°С, если температура воздуха выше -10°С; не ниже 220°С, если температура воздуха +10—15°С. Технические свойства смеси и асфальтобетона: пористость минеральной смеси не более 20%, подвижность смеси при 200°С — не менее 25 мм (определяют с помощью металлического конуса); водонасыщение уплотненных образцов — 1,0% от объема; глубина вдавливания штампа в образцы при температуре 40°С — не более 4 мм.

Цветной асфальтовый бетон состоит из мелкого щебня (5—7 мм), песка, минерального порошка, связующего, пластификатора и пигмента. В качестве вяжущего вещества в нем выступает структурный элемент, слагаемый из связующего и минерального порошка с добавлениями пластификатора и пигмента, поскольку все их частицы практически соизмеримы. В качестве щебня применяют измельченные отходы белого мрамора и известняка. Песок должен быть чистым и светлым, а минеральный порошок — из тонко измельченного белого мрамора. Связующим в цветном асфальте обычно служат кумароно-вые, глифталевые полимеры, а также полиэтилен, поливинилхлорид, поливинил ацетатная эмульсия и др. Из пигментов более цветостойкими являются железный сурик, крон желтый, оксид хрома.

Цветной асфальтобетон применяют для оформления площадей, скверов, остановок городского транспорта, пешеходных переходов и других объектов города.

¹ Мелик-Багдасаров М.С. и др. Устройство асфальтобетонных покрытий методом вибролитья // Наука и техника в строительстве. 1997. 3.

10.3.3. ДЕГТЕБЕТОНЫ

Дегтебетон — искусственный строительный конгломерат, аналогичный асфальтобетону, в котором в качестве органического связующего вещества применяют каменноугольный деготь. Оптимальный состав проектируют общим методом. Чтобы улучшить эластические свойства и снизить температурную чувствительность, в дегти вводят порошкообразные наполнители и определяют физико-механические свойства (в первую очередь прочность) наполненного дегтя при оптимальной структуре. Можно вводить в деготь олигомер или полимер, а также ту или иную комплексную добавку, например полимер и активный дисперсный наполнитель с получением наполненного дегтеполимерного вяжущего вещества. С этой целью используют дегти марок от Д-2 до Д-5, а в качестве полимерного вещества — полистирол, поливинилхлорид. Наполнителями служат молотые каменные угли — длиннопламенные, коксовые, антрацитовые и другие лиофильные порошки, например древесный гидролизный лигнин, фталевый ангидрид. Чаще применяют наполнители — минеральный порошок известняковый, доломитовый и др., а в качестве связующего вещества — чистый и притом обычно составленный деготь, получаемый сплавлением пека и антраценового масла. Соотношение их масс в дегте определяют главным образом по условному показателю вязкости, соответствующего маркам Д-5 — Д-8. Заполнителем в дегтебетоне служат минеральные материалы — щебень и песок, которые используют в асфальтобетоне, но можно применять щебень из более кислых пород — кварцевых песчаников, гранита с повышенным содержанием кварца и др.

В процессе приготовления дегтебетонной смеси придерживаются строгого температурного режима: деготь марки Д-5 нагревают до температуры 80—100°C и не выше, дегти марок Д-6, Д-7 и Д-8 — до 100—130°C, минеральные материалы — до ПО—130°C. Вследствие повышенной температурочувствительности смеси при выпуске ее из смесителя следует поддерживать температуру на уровне 100—120°C. Технические требования к свойствам горячего дегтебетона: предел прочности при сжатии при 50°C — не менее 0,8 МПа, при 20°C — не менее 2 МПа, то же в водо-насыщенном состоянии — не менее 1,5 МПа, коэффициент водостойкости — не менее 0,7, коэффициент теплостойкости — не более 4. При этом диаметр и высота образца равны 5 см; давление при уплотнении образцов — 30 МПа.

Кроме горячего в строительстве применяют и холодный дегтебетон. Требования к нему несколько понижены: прочность при 20°C — не менее 1,2 МПа, а в водонасыщенном состоянии, — не менее 0,8 МПа, коэффициент водостойкости — не менее 0,4. Холодный дегтебетон выпускают двух марок и используют либо без подогрева, либо после прогрева при температуре 90°C.

Горячий дегтебетон применяют для верхнего слоя покрытия дорог III категории и нижнего слоя дорог III и IV категорий, а также для ямочного ремонта дорог. Устройство таких покрытий разрешается только вне населенных пунктов, так как из дегтя могут вымываться вредные компоненты (фенолы).

Кроме крупно-, средне- и мелкозернистого дегтебетона выпускают дегтевый раствор, применяя в нем в качестве заполнителя только песчаную фракцию (песок) с размером частиц от 5 до 0,074 мм в количестве до 25% по массе; она засчитывается как микронаполнитель.

Для аналогичных бетонов и растворов вместо каменноугольного дегтя иногда используют сланцевый деготь (битум) и торфяной. Лучшим качеством обладает сланцевый, по физико-химическим свойствам близкий к нефтебитумам. Обычно обе эти разновидности относятся к местным материалам.

10.4. ДЕСТРУКЦИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОКРЫТИЙ

Ярким проявлением деструктивных процессов, протекающих в асфальтобетоне, особенно в поверхностных слоях покрытий, являются постепенное выкрашивание и шелушение с вырыванием отдельных минеральных частиц, что указывает на понижение адгезии между минеральным и органическим компонентами.

Асфальтобетон, как уже отмечалось, чувствителен к колебаниям температуры внешней среды, что служит источником непрекращающихся структурных изменений. Последние связаны то с повышением концентрации твердой фазы (при снижении температуры) за счет спонтанного выделения из гетерогенной системы новых центров структурообразования, их размножения и обрастания, то с понижением концентрации твердой фазы (при повышении температуры) за счет усиления теплового молекулярного движения с разрушением структурной мицеллярной сетки в вяжущем веществе. Под влиянием этих явлений практически непрерывно изменяется пластичность асфальтобетона и его вяжущей части. В сочетании с напряженным состоянием от механических усилий это приводит к нарушению структуры, к потере деформационной устойчивости. Тепловые флуктуации молекул в сочетании с циклически чередующимися механическими напряжениями нередко сами служат непосредственной причиной разрушения материала.

В асфальтовом бетоне могут возникать остаточные деформации, развиваемые до значительных размеров в дорожных и аэродромных покрытиях, с появлением наплывов, сдвигов, волн, складок, смещений, например в кровельных и гидроизоляционных коврах. Этим деформациям необратимого характера способствует повышение температуры, поэтому для повышения теплоустойчивости важно обеспечить оптимальный состав и оптимальную структуру асфальтового бетона применительно к данным, конкретным условиям.

При отрицательных температурах, особенно при резких колебаниях температуры, возникают тепловые напряжения и возможны хрупкие микро- и макроразрывы, нарушение сплошности асфальтобетонных покрытий.

Асфальтобетон чувствителен не только к тепловому фактору, но и к водной среде. Разрушение структуры под влиянием водного фактора происходит в результате нарушения сцепления битумных пленок с минеральными частицами, причем тем быстрее, чем интенсивнее протекает диффузия и больше воды продиффундировало в монолитный материал. Этот процесс можно затормозить, например, уплотнением, очисткой покрытия от пылевых наносов и др., однако нельзя его полностью приостановить, особенно при длительном контакте покрытий, например дорожных, с водой в осенний и весенний периоды в средней климатической полосе страны. Проникновение воды начинается с гидрофилизации поверхности за счет «застревания» в ней молекул воды, поверхностной сорбции, чему способствует тепловое движение (энтропийный фактор). Диффузии воды способствуют также уменьшенное количество асфальтенов в битуме, увеличенное содержание асфальтеновых кислот, водорастворимых соединений типа фенолов (например, в дегтях), повышенная гидрофильность минеральных наполнителей. Вода как сильно полярная жидкость способна вначале оттеснять с поверхности минералов менее полярные молекулы, ранее адсорбировавшиеся из битума, а затем сильно обводнять систему, создавая эффект набухания. В соответствии с электрохимической теорией набухания интенсивная аккумуляция воды на поверхности минеральных частиц растет с повышением плотности заряда и, следовательно, с уменьшением диаметра этих частиц. Набухание обусловлено прониканием молекул воды или иной среды в объем тела как диффузионным путем, так и по механизму капиллярного потока, поскольку в структуре тела практически всегда имеются микропоры, субмикротрещины различных размеров и форм.

Наиболее уязвимой структурной частью асфальтового бетона является асфальтовое вяжущее вещество, а от его стойкости к водной среде и колебаниям температуры зависят согласно закону конгруэнции качественные показатели асфальтового бетона, его прочность, теплостойкость, долговечность и т. д. При тепловых перепадах через 0°C происходит разуплотнение асфальтобетона вследствие циклического замерзания воды в порах покрытия. Разуплотнение связано с увеличением пористости и с возрастанием притока воздуха внутрь покрытия, что сопряжено с активизацией процесса окисления органического вяжущего вещества. И хотя вода сама по себе является слабым окислителем битума или дегтя, она благоприятствует интенсивному их окислению вследствие повышения пористости и доступа воздуха в монолит. Воздействие воздуха основано на окислении и полимеризации углеводородов, в частности, непредельного ряда, с изменением группового химического состава и свойств битума или дегтя.

Окислительный процесс ускоряется под комплексным воздействием воздуха, теплоты, солнечного света, особенно его ультрафиолетовых лучей. При ветровом воздействии происходит быстрое вымораживание воды, что в конечном счете приводит к росту хрупкости и количества микропор и трещин в асфальтобетонных покрытиях. С увеличением в битуме кислородсодержащих, азотистых и сернистых соединений стабильность битума уменьшается. К этому же нежелательному эффекту приводит увеличение пористости асфальтобетона после деструкции под влиянием диффузии воды.

Из числа спонтанно развивающихся явлений старения битума, кроме упомянутых окисления и полимеризации, следует еще выделить синерезис и эмульгирование.

Синерезис — самоуплотнение вследствие молекулярного сцепления, а также под влиянием сил тяжести или внешних сил. Из битума постепенно выделяется жидкостная среда (масла и смолы), которая в дальнейшем либо сорбируется минеральными компонентами, либо под внешним давлением выдавливается наружу, выступая в виде «жирных» пятен. В первом случае возрастает концентрация асфальтенов в битуме и асфальтовом вяжущем веществе с упрочнением структуры и повышением жесткости материала. Во втором случае расслабляются структурные связи при высоких температурах и появляются пластические деформации в верхних слоях покрытий.

Эмульгирование битума может быть вызвано присутствием в окружающей среде или в компонентах смеси, например в песке, эмульгирующих веществ — глинистых примесей, извести, поверхностно-активных веществ и др. Вынужденный частичный перевод битума в эмульгированное состояние приводит к снижению адгезионных свойств, некоторой потере связности в монолите. Если изменения в структуре под влиянием температурных факторов нередко являются временными и носят обратимый характер, то синерезис и эмульсификация могут завершиться необратимыми явлениями ухудшения качества асфальтобетона.

К старению битума и дегтя может приводить также длительный контакт с некоторыми материалами, содержащими полутонные оксиды железа и алюминия.

Независимо от причин старения битума и асфальтобетона всегда происходит количественное и качественное изменение их состава. Интенсивность изменения группового динамического состава битума нередко служит достаточной характеристикой старения материала. Более точно старение битума можно определять по кинетике роста вязкости во времени. По формуле $\eta = A e^{\varphi \tau}$, где φ — фактор старения; τ — продолжительность старения; A — постоянная, можно найти величину τ долговечности до критического значения $\eta_{кр}$. Для этих целей в лабораторных условиях моделируют эксплуатационные условия. Вместо вязкости пользуются также некоторыми другими характеристиками качества, чувствительными к старению битума, например величиной сдвигоустойчивости.

Для торможения деструкции асфальтового бетона на стадии технологии и в эксплуатационный период применяют различные меры. Важно обеспечивать высокую плотность структуры и поддерживать ее на этом уровне, вносить компоненты,

повышающие деформативность монолита (не выходя за допустимые пределы); увеличивать гидрофобность асфальтобетона; снижать время релаксации напряжений (в допустимых пределах); своевременно восстанавливать поверхностные слои и надежнее изолировать их от внешней агрессивной среды; использовать только оптимальные составы и оптимальную структуру асфальтового бетона; вносить в составы стабилизаторы структуры, энергетически связывающие проникшую воду, и т. п.

Строительные конгломераты на основе органических полимеров и пластмассы**11.1. ПРИРОДНЫЕ И ИСКУССТВЕННЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ**

Полимерами называют высокомолекулярные вещества, молекулы которых состоят из огромного количества структурных звеньев, взаимодействующих друг с другом посредством ковалентных связей с образованием макромолекул. Макромолекулы во много тысяч раз превышают размеры обычных молекул. Так, например, если молекула воды состоит из трех атомов, а ее молекулярная масса равна 18 единицам, или если молекула кальцита CaCO_3 состоит из пяти атомов, а молекулярная масса этого минерала равна 100, то молекулы высокомолекулярных веществ содержат десятки и сотни тысяч атомов, а их молекулярная масса достигает значений, выражаемых десятками и сотнями тысяч единиц. Так, у природного полимера_целлюлозы она равна 300 000 и более, у искусственных органических полимеров, например у полиэтилена низкого давления, колеблется в пределах от 26 000 до 150 000, у полиизобутилена, поливинилацетата, политетрафторэтилена и других — до 500 000—550 000 и более, превышая иногда один миллион единиц.

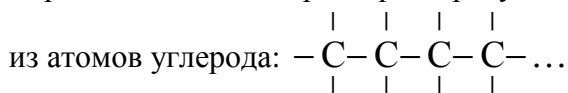
Полимеры разделяют на органические и неорганические. Главная особенность органических полимеров, отличающая их от неорганических, заключается в наличии в макромолекулах атомов углерода. В неорганических высокомолекулярных соединениях (полимерах) атомов углерода не содержится. Органические и неорганические полимеры подразделяют на природные и искусственные. В данной главе рассматриваются полимеры органические и преимущественно искусственные; что касается органических природных полимеров, то они используются в строительстве значительно реже. Среди них заслуживает внимания древесина. Образующие ее целлюлоза и лигнин являются типичными примерами природных полимеров.

В результате воздействия на целлюлозу хлорэтилом в присутствии едкой щелочи или другими реагентами получают этилцеллюлозу, метилцеллюлозу и бензилцеллюлозу. Эти простые эфиры целлюлозы не отличаются высокими техническими свойствами, но используются для изготовления лаков, клеящих веществ, антикоррозионных покрытий и оболочек. В строительстве чаще применяют сложные эфиры целлюлозы — нитроцеллюлозу и ацетилцеллюлозу. Из нитроцеллюлозы изготовляют целлулоид как простейший вид пластика, но, к сожалению, весьма горючего и поэтому в строительстве не используемого. Второй сложный эфир-ацетилцеллюлозу применяют при изготовлении органического стекла, но в большей мере — при изготовлении лаков по дереву и металлу, так как они образуют водонепроницаемые и достаточно прочные покрытия.

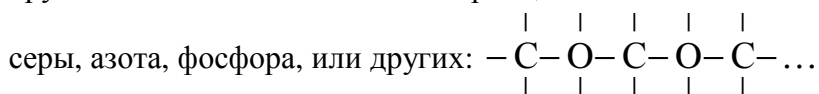
Из других природных органических веществ следует отметить белковые продукты и боннскую кровь. На их основе получают соответственно галалит и альбумин. Первый служит поделочным материалом, второй — для получения клея при производстве фанеры. Кроме того, исходное вещество применяют при производстве пенообразователя ГК, используемого в ячеистых бетонах. К природным полимерам относятся также хлопок, шерсть, кожа, каучук и др. Наиболее значимыми в строительстве являются природные каучуки, но дешевле их заменить синтетическими каучуками или каучукообразными полимерами.

Подавляющее большинство полимеров — искусственные. Их получают с помощью синтеза простых низкомолекулярных веществ, называемых мономерами. По составу основной цепи макромолекул органические полимеры разделяются на карбоцепные, гетероцепные и элементоорганические.

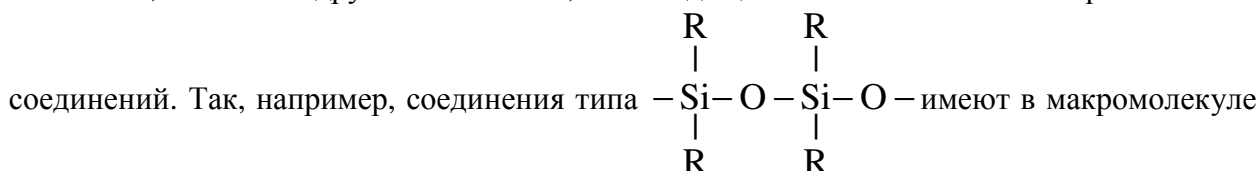
Карбоцепные полимеры характеризуются тем, что их молекулярные цепи целиком состоят



Гетероцепные полимеры имеют в составе цепей кроме атомов углерода еще и некоторые другие атомы элементов — кислорода,



Элементоорганические полимеры могут содержать в основной цепи атомы кремния, алюминия, титана и других элементов, не входящих в состав обычных органических



кремний-кислородные связи, именуемые силоксановыми.

По строению макромолекул органические полимеры могут быть линейными, разветвленными и сетчатыми (трехмерными). При линейном строении все молекулы вытянуты в виде цепей, в которых атомы мономера, являющиеся исходным низкомолекулярным соединением, химически связаны между собой. Разветвленные макромолекулы характерны наличием мономерных звеньев, ответвленных от основной цепи полимера. Сетчатые (пространственные) макромолекулы характеризуются химической «сшивкой» отдельных линейных или разветвленных цепей полимера поперечными связями (рис. 11.1).

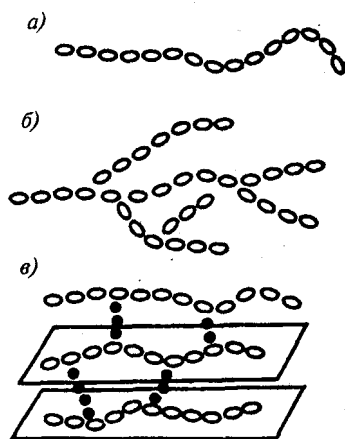


Рис. 11.1. Строение молекул полимеров:

a — линейная структура; *б* — разветвленная структура; *в* — структура пространственного полимера

Полимеры с макромолекулами линейного и разветвленного строения при нагревании плавятся с изменением свойств, а также способны растворяться в соответствующих органических растворителях. При охлаждении такие полимеры вновь отверждаются (так в отношении полимеров называется процесс отвердевания). Они способны многократно размягчаться при нагревании и отверждаться при охлаждении; их называют термопластичными (термопластами). Полимеры с макромолекулами трехмерного строения имеют повышенную устойчивость к термическим и механическим воздействиям, не растворяются, а лишь набухают в растворителях. Они не могут размягчаться при повторном нагревании; их именуют термореактивными (реактопластами). При высокотемпературном нагревании они подвержены деструкции и сгоранию.

Органические полимеры в твердом состоянии имеют обычно аморфную структуру. Однако существуют полимеры, которые в твердом состоянии характеризуются кристаллической или аморфно-кристаллической структурами.

В зависимости от способа получения полимеры разделяют на две группы: полимеризационные (термопласты) и поликонденсационные (реактопласты).

Полимеризационные полимеры получают полимеризацией исходных мономеров с раскрытием кратных связей ненасыщенных углеводородов и соединением элементарных звеньев мономера в длинные цепи. Поскольку при полимеризации мономеров атомы и их группировки не отщепляются, то побочных продуктов в реакциях не образуется, а химический состав мономера и полимера остается одинаковым. В полимеризации могут участвовать два и более мономеров, тогда ее называют сополимеризацией, а продукт — сополимером.

Поликонденсационные полимеры получают в процессе объединения (поликонденсации) двух или нескольких низкомолекулярных веществ. При протекании реакций образуется не только основной продукт, но и побочные соединения — вода, спирт и др., так что химический состав полимера всегда отличается от химического состава исходных продуктов поликонденсации.

Используемые в обоих процессах производства полимеров исходные сырьевые мономеры, способные при определенных условиях соединяться друг с другом, получают при переработке природных и нефтяных газов, каменного угля, аммиака, угольной кислоты и других веществ. По мере протекания процессов полимеризации и поликонденсации возрастает число атомов в образуемых макромолекулах и растет молекулярная масса формирующихся полимеров. Вначале образуются вещества с еще сравнительно невысокой молекулярной массой (до 5000 единиц), называемые олигомерами, по консистенции — смолообразные. Вещества с более высокой молекулярной массой называются полимерами, растворимость, а также эластичность которых снижаются, но возрастает прочность — одно из важнейших свойств полимера вследствие возрастающего эффекта действия межмолекулярных сил при росте молекулярной массы, что, кстати, отсутствует в обычных органических веществах типа битума и дегтей. Следует отметить, что на свойства полимера существенное влияние оказывает и водородный тип связи, особенно когда водород непосредственно связан с кислородом или азотом (ОН, МШ и др.). Водородная связь, хотя и слабее ковалентной, но значительно прочнее межмолекулярных (ван-дер-ваальсовых) сил притяжения.

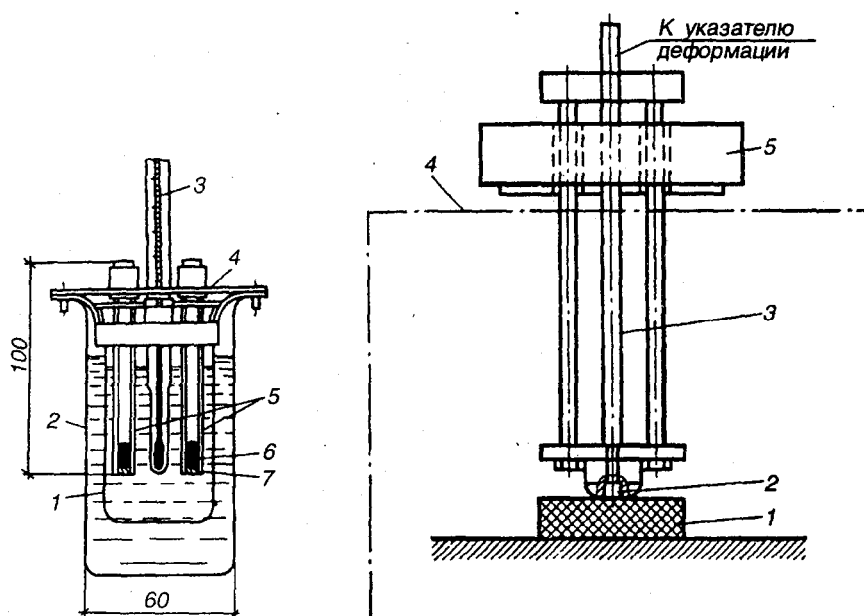


Рис. 11.2. Прибор Кремер—Сарнова:

1 — внутренний стакан; 2 — наружный стакан; 3 — термометр; 4 — диск; 5 — трубочки; 6 — ртуть; 7 — полимер для его испытания

Рис. 11.3. Схема прибора Вика для определения теплостойкости полимеров: 1 — образец; 2 — наконечник; 3 — стержень; 4 — термошкаф; 5 — груз

Технической характеристикой многих полимеров служат следующие свойства: термические — температура размягчения и теплостойкость, температуры стеклования и текучести; механические — прочность, деформативность и поверхностная твердость; химические — атмосферостойкость и сопротивляемость деструкции. Каждое из этих свойств определяется стандартными методами, излагаемыми в соответствующих лабораторных практикумах по полимерным материалам. В частности, температуру размягчения определяют по методу Кремер—Сарнова (рис. 11.2) или по «КиШ», теплостойкость — на приборах Мартенса или Вика (рис. 11.3), температуры стеклования и текучести — по методу Каргина, а механические свойства полимеров аморфного строения — с помощью диаграмм относительных деформаций (рис. 11.4).

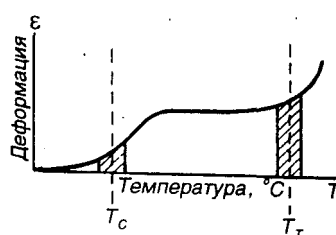


Рис. 11.4. Термомеханическая кривая термопластичных полимеров

Наряду с положительными свойствами полимеров — малой средней плотностью, низкой теплопроводностью, высокой химической и атмосферной стойкостью, высокой прочностью и др. — они с позиций качества строительных материалов обладают и рядом недостатков — низкой теплостойкостью, малой поверхностной твердостью, невысоким модулем упругости, значительной ползучестью, склонностью к старению, а также высокой стоимостью. Она может быть несколько снижена за счет применения в полимерах наполнителей и добавок.

11.1.1. ПОЛИМЕРИЗАЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРЫ (ТЕРМОПЛАСТЫ)

Термопласты получают способом полимеризации по схеме: $nM \rightarrow (M)_n$, где M — молекула исходного мономера; $(M)_n$ — макромолекула после химического синтеза, состоящая из n мономерных звеньев; n — степень полимеризации.

Процесс полимеризации включает, в основном, три элементарных реакции: образование активного центра, рост цепи и обрыв цепи. Эти реакции могут осуществляться различными способами, но по следующей принципиальной схеме: образование активного центра ... $M \rightarrow M^\circ$; рост цепи ... $M^\circ + M_1 \rightarrow M_2^\circ + M_1$, $M_2^\circ + M_3 \rightarrow M_3^\circ + M_2$, ..., M_n° ; обрыв цепи ... $M_n^\circ \rightarrow Pn$, где M — молекула мономера; M° — активный центр; M_2° , M_3° , ..., M_n° — растущий радикал; Pn — молекула полимера (макромолекула).

В зависимости от химической природы активных центров различают радикальную и ионную полимеризацию. При *радикальной полимеризации* активными центрами являются свободные радикалы, образующиеся при распаде перекисей и азосоединений, от воздействия на мономер дополнительной энергии (нагревание, световые и другие облучения и др.). При *ионной (каталитической) полимеризации* активными центрами служат ионы, образующиеся при распаде катализаторов ($AlCl_3$, BF_3 , $TiCl_4$), которыми являются щелочные и щелочноземельные металлы, кислоты и металлоорганические соединения. В промышленности используют три способа полимеризации: в блоке, в растворе и в эмульсии (суспензии).

Блочная полимеризация может осуществляться без растворителей периодическим или непрерывными способами. В первом случае получают блок полимера, имеющий форму сосуда (емкости), в котором происходила реакция полимеризации; во втором — осуществляют непрерывный выход расплава полимера из реактора. Этот способ характеризуется полимеризацией мономера в «чистом» виде в присутствии инициатора или катализатора реакции.

Полимеризация в растворе производится «лаковым» способом и в жидкости, не растворяющей полимер. Полученный раствор полимера в растворителе («лак») непосредственно используют в промышленности или полимер выделяют путем осаждения или испарения растворителя. При полимеризации по второму способу применяют жидкость, растворяющую только мономер. По мере образования полимер выделяется из раствора в виде осадка или может быть отфильтрован. Полимеризация в растворе позволяет легко отводить теплоту реакции и регулировать степень полимеризации.

Эмульсионная или суспензионная полимеризация является наиболее распространенной в промышленности для получения многих полимеров. В качестве дисперсионной среды при полимеризации эмульсии или суспензии используют воду с эмульгатором, который улучшает эмульгирование мономера в воде. В зависимости от способа приготовления эмульсии мономера в воде и условий проведения полимеризации различают эмульсионную (латексную) и суспензионную (капельную) полимеризацию.

В качестве эмульгаторов обычно применяют мыла: олеаты, лау-раты щелочных металлов, натриевые соли ароматических сульфо-кислот и др. Часто эмульсионную полимеризацию проводят в присутствии водорастворимых индикаторов (перекись водорода и др.).

Поскольку при капельной полимеризации вводят инициатор реакции, не растворимый в воде, но растворимый в мономере, то полимер образуется как бы в каждой отдельной «капле».

В процессе полимеризации могут возникать полимеры, имеющие неодинаковую конфигурацию отдельных звеньев по всей длине цепи. Такие полимеры называют атактическими (неупорядоченными). Однако при полимеризации в присутствии катализаторов практически всегда образуются полимеры, имеющие одинаковую конфигурацию последовательных звеньев. Их именуют как упорядоченные — изотактические полимеры. Они обладают повышенным качеством.

К важнейшим полимеризационным полимерам (термопластам) следует отнести полиэтилен, полипропилен, полиизобутилен, поливинилхлорид, полистирол, полиакрилаты и др.

Полиэтилен $[-CH_2-CH_2-]_n$ — продукт полимеризации этилена. Выпускается в виде гранул размером 3—4 мм или белого порошка.

Исходным мономером для полимеризации является газообразный этилен $nCH_2 = CH_2$, получаемый чаще всего при термической обработке нефти. В настоящее время промышленность использует следующие методы полимеризации этилена: полимеризация при высоком давлении (до 300 МПа) в присутствии кислорода; при среднем давлении (3,5—7,0 МПа) — в углеродистых растворителях с окисно-металлическими катализаторами, при атмосферном или очень малом давлении (0,5—3 МПа) с металл органическими катализаторами.

Полимеризация этилена при высоком давлении производится в трубчатых реакторах и отличается сложностью технологического оборудования. Полиэтилен высокого давления — химически стойкий продукт плотностью $0,95 \text{ г/см}^3$ и с повышенной эластичностью, что объясняется наличием в нем 45% аморфной фазы.

Производство полиэтилена при среднем давлении основано на полимеризации этилена в растворе. Этот метод производства полиэтилена в нашей стране широкого распространения не нашел.

При получении полиэтилена низкого давления не требуется сложного компрессорного хозяйства. При низком давлении полиэтилен получают полимеризацией этилена в растворе (бензине) непрерывным методом при давлении 0,15—0,5 МПа и температуре до 80°C в присутствии катализатора Циглера—Натта (комплексные метал-лорганические соединения).

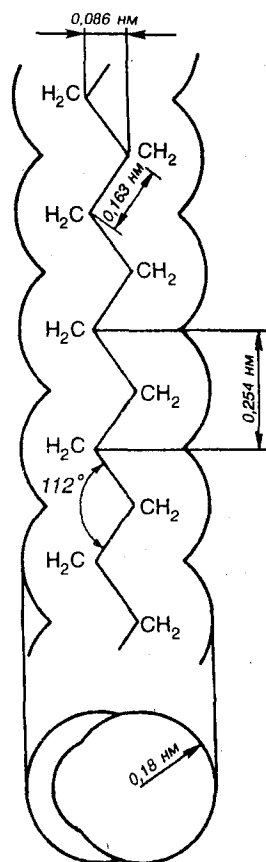


Рис. 11.5. Строение молекулы полиэтилена

Полиэтилен низкого давления имеет значительные теплостойкость, плотность и жесткость. Основным отличием полиэтилена низкого давления является его кристал-

личность, в результате чего — меньшие эластичность, прозрачность и большая твердость. Будучи термопластичным насыщенным полимерным углеводородом, полиэтилен имеет строение молекулы в виде плоского зигзага с периодом идентичности 0,254 (рис. 11.5).

Физико-механические свойства полиэтилена в значительной мере зависят от степени полимеризации, т. е. от молекулярной массы готового продукта. Молекулярная масса полиэтилена находится в пределах: низкого давления 10 000—50 000 и высокого давления 80 000—400 000. Предел прочности при разрыве в зависимости от молекулярной массы полиэтилена колеблется от 18 до 25,5 МПа, плотность 0,92—0,95 г/см³, температура плавления 110—125°C, модуль упругости 150—800 МПа.

Полиэтилен (высокомолекулярный) хорошо поддается механической обработке, стоек против агрессивного действия воды, соляных растворов, щелочей, кислот (кроме азотной). При нормальной температуре он нерастворим в органических растворителях и только при нагревании поддается растворению в ароматических углеводородах.

Полиэтилен применяют для производства труб, пленок, гидроизоляционных материалов, тары и предметов сантехнического оборудования. Порошкообразный полиэтилен успешно используют для антикоррозионной защиты металла. Для производства строительных материалов и изделий выпускают следующие марки полиэтилена: 20606-012 (низкого давления), 11802-070 (высокого давления).

Полистирол $[-CH_2-CHC_6H_5-]_n$ — твердый продукт полимеризации мономера — стирола. Его выпускают в виде прозрачных листов, гранул (блочный полистирол), бисера или белого порошка (эмульсионный полистирол). Макромолекула его имеет полидисперсную разветвленную структуру. Сырьем для производства полистирола служит стирол $C_6H_5CH=CH_2$ — бесцветная воспламеняющаяся жидкость, содержащаяся в некоторых фракциях каменноугольной смолы или вырабатываемая из бензола и этилена. Стирол легко полимеризуется под действием солнечного света и теплоты. В производственных условиях стирол полимеризуют при температуре 80°C в присутствии перекисных соединений (перекиси водорода и перекиси бензоила).

Блочный полистирол имеет высокие механическую прочность (R_p - 35—60 МПа, R = 80—110 МПа) и водостойкость. Молекулярная масса его от 50 000 до 300 000, плотность 1,04—1,06 г/см³, теплопроводность 0,10—0,15 Вт/(м·К). Стоек к действию кислот и щелочей, но имеет хрупкость и невысокую теплостойкость.

Из полистирола изготавливают гидроизоляционные пленки, облицовочные плиты, водопроводные трубы, теплоизоляционные материалы, различную тару, изделия для электропромышленности. Пенополистирол является наполнителем многослойных панелей, хорошим теплоизолятором.

Полипропилен $[-CH_2-CHCH_3-]_n$ — продукт полимеризации пропилена в растворителе (бензин, пропан и др.). Сырьем для получения полипропилена служит бесцветный газ пропилен, выделяющийся при крекинге нефти. Полимеризация пропилена ведется обычно при избыточном давлении 4 МПа и температуре 70°C. Молекулярная масса полимера колеблется в широких пределах от 35 000 до 150 000. Пропилен хорошо сопротивляется воздействию органических растворителей и имеет ряд других положительных свойств. К недостаткам полипропилена следует отнести его малую атмосферостойкость. При воздействии солнечных лучей он подвергается деструкции с заметным ухудшением первоначальных физико-механических свойств. Является перспективным полимером для производства труб, пленок и других изделий, используемых в строительстве при изготовлении бассейнов, пластиковых лестниц и других конструкций.

Поливинилхлорид $[-CH_2-CHCl-]_n$ — продукт полимеризации хлористого винила. Выпускается в виде порошка без запаха и вкуса с размером зерен от 0,01 до 0,1 мм.

Сырьем для получения поливинилхлорида служит хлористый винил $CH_2=CHCl$ — при атмосферном давлении газ с эфирным запахом. Его получают из ацетилена или из дихлорэтана.

В результате полимеризации хлористого винила (винилхлорида) образуется полимер, молекула которого имеет линейное строение.

К важнейшим техническим свойствам поливинилхлорида следует отнести его относительно высокую ударную вязкость, прочность при разрыве (до 60,0 МПа), устойчивость к воздействию щелочных и кислых растворов, а также высокие диэлектрические свойства. Его истинная плотность 1,3—1,4 г/см³, водопоглощение за 24 ч 0,4—0,5%, теплопроводность 0,16 Вт/(м·К), твердость по Бринеллю до 16.

Изделия на основе этого полимера (трубы, плитки) легко свариваются в струе горячего воздуха при температуре 200°C.

Недостаток поливинилхлорида — сравнительно низкая температура размягчения (70°C). При нагревании этого полимера до 140—150°C начинается его разложение с выделением хлористого водорода, каталитически ускоряющего процесс разложения.

На основе поливинилхлорида изготавливают синтетические лино-леумы, плитки для пола, линкруст, трубы, газонаполненные пластмассы, строительные профили для окон (оконные переплеты) и двери, облицовочные панели типа «Сайдинг» — методом экструзии. Пластифицированный поливинилхлорид широко используют для получения гидроизоляционных и упаковочных пленок; хлорированный поливинилхлорид с содержанием 60—80% хлора (перхлорвинил) применяют для получения стойких лаков и фасадных красок.

Полиизобутилен $[-CH_2-C(CH_3)_2-]_n$ — продукт полимеризации изобутилена, полимер без цвета и запаха. Сырьем для получения полимера служит изобутилен, образующийся при переработке нефти. В процессе производства полиизобутилена полимеризация осуществляется при пониженных температурах (-110°C), что достигается отводом теплоты с помощью хладагентов и разбавителей, добавляемых в реакционную смесь.

Полиизобутилен с молекулярной массой менее 50 000 — вязкая жидкость. В технике этот полимер применяют с большой молекулярной массой — 300 000, предоставляющий собой каучукоподобный эластичный материал (относительное удлинение 1000—2000%). Полиизобутилен имеет ряд положительных свойств. Он достаточно легкий (плотность 0,91 г/см³), водостоек (водопоглощение 0,05%) и стоек к действию агрессивных сред. Предел прочности полиизобутилена при разрыве 6,0—7,0 МПа. Полиизобутилен в виде листов и пленок применяют в качестве хорошего гидроизоляционного материала. В отличие от каучука не способен к вулканизации (химической «сшивке» молекул).

Поливинилацетат — продукт цепной полимеризации винилацетата, сложного эфира уксусной кислоты и винилового спирта. Поливинилацетатные полимеры применяют в виде водных эмульсий для устройства бесшовных полов и изготовления лакокрасочных материалов. Они эластичны, светостойки и хорошо прилипают к поверхности различных материалов.

Индено-кумароновые полимеры — продукты полимеризации соединений — индено-кумарона и их гомологов, содержащихся в сыром бензоле и фенольной фракции каменноугольной смолы. Их выпускают в виде кусков или чешуек плотностью 1,05—1,2 г/см³. Эти полимеры применяют для производства плиток для пола, изготовления лаков и красок для внутренней отделки.

Полиметилметакрилат (органическое стекло) — продукт полимеризации метилового эфира метакриловой кислоты. Он представляет собой совершенно прозрачный полимер в виде листов, блоков и прессовочных порошков.

Сырьем для получения органического стекла служит метилметакрилат, синтезируемый из ацетона путем его сложной химической переработки. Полимеризация ведется блочным методом при получении полимера с молекулярной массой более 200 000 и эмульсионным — для производства порошкообразного продукта с молекулярной массой от 4000 до 100 000.

Изделия из органического стекла имеют относительно высокую прочность при сжатии (предел прочности до 160 МПа), растяжении и изгибе (до 100 МПа), а также

значительную ударную вязкость. Полиметилметакрилат легко поддается механической обработке (резанию, шлифованию и полировке) и почти не снижает своих свойств при пониженных температурах. Он отличается исключительной прозрачностью и способностью пропускать до 74% ультрафиолетовых лучей. Однако следует заметить, что при соприкосновении с огнем полимер горит, не стоек в отношении агрессивных сред, легко растворяется в ряде органических растворителей (ацетон, уксусная кислота и др.). Высокая стоимость этого полимера и недостаточная абразивостойкость ограничивают его применение в строительстве.

Полиметилметакрилат используют для остекления зданий специального назначения, витрин магазинов, веранд, оранжерей, больниц, для изготовления светильников, фонарей производственных цехов и т. п. Его можно получать окрашенным в различные цвета, прозрачным и непрозрачным.

Синтетические каучуки — эластичные продукты цепной полимеризации различных углеводородных мономеров: изопрена, дивинила (бутадиен), хлоропрена и др. Изопрен представляет собой газ, переходящий при температуре -35°C в бесцветную жидкость. Его получают в промышленном масштабе путем взаимодействия изобутилена с формальдегидом. Дивинил — бесцветный газ, подобно изопрену, относится к соединениям с двойными связями и имеет наибольшее применение в производстве синтетических каучуков. В промышленности его получают из этилового спирта, бутана и ацетальдегида. Хлоропрен — бесцветная жидкость, синтезируемая из ацетилена и хлористого водорода.

В зависимости от исходного мономера в процессе полимеризации получают различные виды синтетических каучуков — изопреновые, бутадиеновые, бутадиен-стирольные, хлоропреновые и др.

В группе изопреновых каучуков следует отметить бутилкаучук (СКИ-3). Он представляет собой продукт полимеризации изобутилена с малым количеством (1—5%) изопрена и является важнейшим видом синтетического каучука. Бутилкаучук отличается высокой морозостойкостью, эластичностью, водостойкостью, стойкостью к действию кислорода и сильных кислот. За последнее время особое значение приобрели полиизопреновые каучуки (СКИ). Каучуки этого вида по химическому составу и структуре молекул весьма близки натуральному каучуку, чем и объясняется аналогия свойств этих полимерных материалов. Полиизопреновые каучуки обладают высокими прочностными показателями при растяжении, эластичностью при статических и динамических нагрузках, а также высокой стойкостью при нагревании и окислении.

Из группы бутадиеновых каучуков следует выделить поливиниловый. Он является первым в мире синтетическим каучуком. В настоящее время промышленность выпускает полидивиниловый (СКД), бутадиен-стирольный (СКС), бутадиен-нитрильный и др. По эластичности эти каучуки близки к натуральным каучукам, но превосходят их по теплостойкости и стойкости к истиранию.

Хлоропреновые каучуки получают в процессе эмульсионной полимеризации хлоропрена, обладающего высокой полимеризационной активностью благодаря наличию в нем атома хлора. В нашей стране хлоропреновые каучуки выпускают различных марок под общим названием — наириты. Эти каучуки имеют высокую клейкость, стойкость против воздействия кислорода, света, кислот и щелочей. Они обладают повышенной газонепроницаемостью, огнестойкостью (обугливаются, но не горят), высокой масло- и бензостойкостью, низкой растворимостью и набухаемостью в растворах телюх. Однако хлоропреновые каучуки склонны к повышенной кристаллизации при нормальной (комнатной) температуре и имеют малую морозостойкость.

В строительстве синтетические каучуки применяют для производства различных клеев и мастик (битумно-кумароно-каучуковые, кумароно-каучуковые и др.). Их используют также для модификации различных полимеров с целью повышения их упругих свойств. Синтетические каучуки находят широкое применение для изготовления герметиков и

герметизации швов между панелями при крупнопанельном домостроении; при изготовлении пластобетонов и растворов; для получения различного вида резин.

Синтетические латексы представляют собой водные дисперсии синтетических каучуков и по коллоидно-химическим свойствам аналогичны натуральным латексам. Частицы каучука в синтетическом латексе, имея отрицательный заряд, коагулируют под действием электролита. Синтетические латексы лучше (по сравнению с натуральными) проникают в обрабатываемый ими материал, поскольку имеют меньший размер глобул. Свойства пленок, образованных синтетическими латексами, соответствуют свойствам пленок полимеров. Кроме каучука и воды в состав латексов входят эмульгаторы, противостарители и другие компоненты. В настоящее время наибольшее распространение получили бутадиен-стирольные, бутадиен-нитрильные, хлоропреновые латексы. Их применяют обычно для тех же целей, что и синтетические каучуки. Акриловые латексы получают методом эмульсионной сополимеризации метакриловой и акриловой кислот или стирола с эфиром этих кислот (стирол-акриловые латексы). Используют для штукатурных, клеевых и других работ. Основные физико-механические свойства полимеризационных полимеров приведены в табл. 11.1.

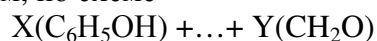
Таблица 11.1. Основные физико-механические свойства полимеризационных полимеров

<i>Наименование полимера</i>	<i>Свойства</i>					
	<i>плотность, г/см³</i>	<i>молекулярная масса</i>	<i>предел прочности при растяжении, МПа</i>	<i>водопоглощение, % по массе</i>	<i>коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)</i>	<i>Мрз, °С</i>
Полиэтилены:						
высокого давления	0,92	до 50 000	17,8	0,01	—	-60
низкого давления	0,95	80 000—400 000	24,5	—	—	-80
Полиизобутилен	0,91—0,93	—	5,9-6,9	0,05	0,12—0,13	-50
Поливинилхлорид	1,3-1,4	—	29,0—36,8	0,4-0,6	0,16	
Полистирол	1,04—1,07	—				

11.1.2 ПОЛИКОНДЕНСАЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРЫ (РЕАКТОПЛАСТЫ)

Поликонденсационные полимеры (реактопласты) получают в процессе реакции поликонденсации. При поликонденсации высокомолекулярное соединение образуется в результате последовательного взаимодействия молекул, содержащих две или несколько функциональных групп, способных вступить в реакцию ($\text{H}_2\text{—OH}_2$; Cl=NH_2 ; COOH и др.). Она протекает обычно при нагревании или под действием катализаторов. Кроме полимера выделяются побочные низкомолекулярные продукты (вода, хлористый водород, спирты и др.).

Схему синтеза конденсационных полимеров можно представить на примере взаимодействия фенола и формальдегида. Фенол $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ при нагревании в водных растворах кислот или щелочей вступает в реакцию с формальдегидом, растворенным в воде, т. е. формалином, по схеме



фенол + формальдегид полимер + H_2O

При реакции поликонденсации в зависимости от состава исходных продуктов могут образовываться как линейные цепи макромолекул, придающие полимеру термопластичные свойства, так и цепи пространственного строения — термореактивные полимеры.

Из полимеров, полученных поликонденсацией, в строительстве чаще всего используют фенолоформальдегидные, карбамидные, полиэфирные, эпоксидные, полиамидные и некоторые другие полимеры.

Фенолоформальдегидные полимеры получают путем поликонденсации фенола с формальдегидом. Фенол $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ представляет собой бесцветные кристаллы игольчатого типа с характерным сильным запахом. Он токсичен, вдыхание его приводит к отравлению, а попадание на кожу вызывает ожоги. Формальдегид — газ с резким удушливым запахом, 40%-ный раствор его в воде называют формалином (CH_2O).

В зависимости от соотношения исходных продуктов поликонденсации, характера катализаторов получают различные виды фенолоформальдегидных полимеров. При избытке фенола и конденсации в кислой среде получают новолачные (термопластичные) полимеры с линейным строением молекул. При избытке формальдегида и конденсации в щелочной среде образуются резольные (термореактивные) полимеры с сетчатым (трехмерным) строением молекул. В процессе поликонденсации резольных полимеров можно выделить три основные стадии: *A* — резолы, *B* — резистолы и *C* — резиты.

Полимер в стадии *A* растворяется в спирте, ацетоне и других органических растворителях и с большей или меньшей скоростью в зависимости от температуры переходит в неплавкое и нерастворимое состояние (процесс отверждения). Полимер в стадии *B* теряет способность плавиться при нагревании, растворяться в органических растворителях и только набухает. Конечная стадия конденсации, стадия *C*, характерна неплавкостью и нерастворимостью полимера.

Фенолоформальдегидные полимеры в твердом состоянии характеризуются высокой поверхностной твердостью и представляют собой хрупкие стеклообразные массы. Одним из достоинств феноло-формальдегидных полимеров является их способность хорошо совмещаться с наполнителями и давать материалы более прочные, теплостойкие и менее хрупкие, чем сами полимеры. Эти полимеры отличаются высокой адгезией к древесине, хлопчатобумажным тканям, бумаге. Фенолоформальдегидные полимеры и материалы на их основе обладают исключительно высокой химической стойкостью. Они используются для производства клеев, древесностружечных, древесноволокнистых и слоистых плит и пластиков, бумажносло-истых пластиков, водостойкой фанеры, сотовых пластов, минераловатных и стекловатных матов, спиртовых лаков.

Карбамидные (мочевиноформальдегидные) полимеры — продукты реакции поликонденсации мочевины и ее производных (тиомочевины, меламина) с формальдегидом.

Мочевина — карбамид $[\text{CO}-(\text{NH}_2)_2]$ в чистом виде представляет собой кристаллы без цвета и запаха, хорошо растворимые в воде и хлороформе; получают нагреванием под давлением смеси аммиака и углекислого газа.

В результате взаимодействия мочевины с формальдегидом в процессе поликонденсации могут быть получены термопластичные и термореактивные полимеры. По сравнению с фенолоформальдегидными полимерами стоимость их ниже. Они светостойки, но вместе с тем менее водостойки, имеют пониженную химическую стойкость и большую хрупкость.

Мочевиноформальдегидные полимеры применяют для изготовления отделочных материалов — слоистых пластиков, а также древесностружечных плит и пенопластов. Изделия на основе этих полимеров отличаются светлым тоном и хорошо окрашиваются в любой цвет.

Меламиноформальдегидные полимеры — продукты поликонденсации меламина и формальдегида. Меламин — кристаллическое вещество, растворимое в воде, амид циануровой кислоты.

Процесс конденсации этих полимеров сходен с процессом конденсации мочевины с формальдегидом. Однако меламиноформальдегидные полимеры вследствие большего числа связей («сшивок») обладают повышенной прочностью, твердостью и теплостойкостью.

Обычные продукты конденсации меламина и формальдегида имеют ограниченное применение в строительстве и вследствие растворимости в воде используются в виде водных растворов.

Полиуретан — продукт взаимодействия диизоцианатов и многоатомных спиртов, т. е. веществ, в молекулы которых входят две изоцианатные группы ($\text{O}=\text{C}=\text{N}$) и две или более гидроксильные группы.

Полиуретаны чаще всего бывают линейными микрокристаллическими высокополимерами. Однако при применении веществ с полиреактивностью более двух (трехатомных спиртов или триизоцианатов) могут быть получены и термореактивные разновидности.

Полиуретаны применяют для изготовления волокон, лакокрасочных покрытий, гидроизоляционных пленок и клеев. Большое значение приобретает этот полимер для производства газонаполненных пластмасс малой плотности (до 30 кг/м^3), обладающих хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами.

Полиэфирные полимеры — высокомолекулярные соединения, получаемые в результате поликонденсации многоосновных кислот со спиртами. Широкое применение получили главным образом глифталевые полимеры, синтезируемые путем взаимодействия глицерина с ангидритом фталевой кислоты. Глицерин — простейший трехатомный спирт — $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$ и фталевый ангидрит $(\text{C}_6\text{H}_4\text{CO})_2\text{O}$ в результате реакции поликонденсации образуют глифталевый полимер с трехмерными сетчатыми молекулами.

В промышленности строительных материалов глифталевые полимеры используют при изготовлении лаков, эмалей и грунтовок для внутренней отделки помещений.

Полиэфиры, полученные конденсацией малеинового ангидрида и этиленгликолей, называют полиэфирмалеинатами. Полиэфирмалеинатные полимеры выпускают марок ПН-1, ПН-2 и др.

Полиэфиры вследствие относительной дешевизны, а также развитой сырьевой базы для их получения имеют широкое применение в качестве прочных и теплостойких лакокрасочных покрытий.

Эпоксидные полимеры (полиэпоксиды) — продукты поликонденсации двух органических низкомолекулярных соединений, из которых одно должно содержать эпоксигруппу

$= \begin{array}{c} C-C= \\ \backslash \quad / \\ O \end{array}$, а другое иметь подвижный атом водорода (фенолы, спирты и др.). Одной из

типичных разновидностей этих полимеров является полиэпоксид, получаемый конденсацией эпихлоргидрина и диоксифенолпропана. Эпоксидные полимеры могут быть получены как в твердом, так и в жидком состоянии. Для отверждения эпоксидных полимеров (смола) используют два вида отвердителей — каталитического и «сшивающего» действия. К отвердителям каталитического действия относят диметиламинометилфенол, фтористый бор и др., к отвердителям второго вида — полиамины, полисульфиды и др. При отверждении эпоксидных полимеров не выделяются побочные продукты реакции, что способствует изготовлению изделий на этих полимерах.

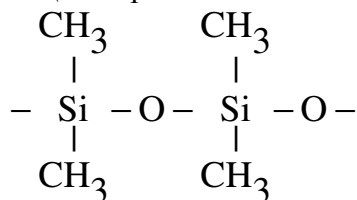
Эпоксидные полимеры обладают исключительно высокой адгезией почти ко всем материалам, в том числе к металлам, бетону, древесине, стекловолокну, хлопчатобумажным тканям. Они хорошо совмещаются со многими полимерами и после отверждения характеризуются высокой химической стойкостью, а также относительно высокой теплостойкостью — до 140—150°C.

Промышленность выпускает следующие марки эпоксидных полимеров: ЭД-8, ЭД-10, ЭД-14, ЭД-20 и др.

При добавлении к эпоксидным полимерам некоторых наполнителей и пластификаторов получают хорошо цементирующий материал для герметизации стыков и ремонта труб.

Полиамидные полимеры — продукты реакции поликонденсации двухосновных кислот и диаминов. По своему строению и способу получения они сходны с полиэфирами. Полиамидные полимеры представляют собой твердые, высокоплавкие вещества с микрокристаллической структурой и термореактивными свойствами. В строительстве они нашли применение для изготовления влагоизолирующих пленок, используемых при производстве бетонных работ.

Кремнийорганические полимеры (полиорганосилоксаны) — высокомолекулярные соединения, главные цепи макромолекул которых состоят из чередующихся атомов кремния и кислорода (кремнеземистый остов молекулы), а углерод входит в состав групп, обрамляющих главную цепь (R — радикал типа CH_3):



Эти полимеры, получаемые из низкомолекулярных соединений — ал-килхлорсиланов и др., отличаются повышенными жесткостью и теплостойкостью. В этом смысле они как бы обладают свойствами, присущими как силикатным материалам (прочность, твердость, теплостойкость), так и органическим полимерам (эластичность, гидрофобность, морозостойкость). Кремнийорганические полимеры в зависимости от строения исходных мономеров могут иметь линейное и пространственное строение молекул. Низкомолекулярные разновидности кремнийорганических полимеров в виде жидкостей ГКЖ-10, ГКЖ-11, ГКЖ-94 применяют для приготовления водоотталкивающих красок и придания бетонам и растворам гидрофобных свойств. Высокомолекулярные кремнийорганические полимеры используют: линейные — в герметиках, так как являются каучуками; химически «сшитые» — в пластиках для склеивания волокон и в жароупорных эмалях и лаках.

Основные физико-механические свойства поликонденсационных полимеров приведены в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Физико-механические свойства поликонденсатов

Наименование полимеров	Плотность,	Теплостой-	Предел прочности,	Ударная
------------------------	------------	------------	-------------------	---------

	$г/см^3$	кость по Мартенсу, °C	МПа		вязкость, Дж/м ²
			при растяжении	при сжатии	
Фенолоформальдегидные (резольные)	1,28	80—110	25—50	70—150	2—6
Мочевиноформальдегидные	1,45	70—100	12—50	80—110	0,6—0,7
Эпоксидные	1,2	60—140	40—80	70—160	10—25
Кремнийорганические	1,8	250—350	—	400— 600	—

11.2. НАПОЛНИТЕЛИ, ЗАПОЛНИТЕЛИ И ДОБАВОЧНЫЕ ВЕЩЕСТВА В ИСК

Наполнители в полимерных конгломератах и пластмассах имеют более широкое понятие, чем в других ИСК. К данной группе материалов относят не только порошкообразные вещества, частицы которых, как отмечалось ранее, соизмеримы с частицами связующего или вяжущего вещества, но и имеют макрочастицы, которые ранее относились к заполнителям. И только в полимербетонах как основной разновидности ИСК на основе органического полимера компонентами могут служить пески и более крупные частицы в виде щебня и гравия, которые также нередко называют заполнителями. Кроме порошкообразных, наполнителями полимерных конгломератов, особенно типа пластмасс, могут быть волокнистые и листовые вещества.

Все наполнители способствуют в той или иной мере увеличению механической прочности, тепло- и огнестойкости, электро- и теплопроводности конгломератов и пластмасс. Они уменьшают расход дорогостоящего полимера и тем самым снижают себестоимость готовой продукции.

Наполнители и заполнители могут быть природными и искусственными. К последним можно условно отнести и побочные продукты (чаще именуемые как отходы) производства. По вещественному составу те и другие могут быть минеральными и органическими. Из природных минеральных наполнителей (заполнителей) применяют кварцевые пески. Особенно часто используют пылевидный кварцевый песок с частицами мельче 0,063 мм, а также порошкообразный кварц — маршалит. Из карбонатных пород распространенным наполнителем является порошок мела, частицы которого мельче 0,16 мм. Широко применяют тальк, поставляемый двух марок (А и Б), что зависит от его белизны. Среди других природных минеральных наполнителей — асбест, гипс, барит, доломит, каолин, магнезит, слюда молотая, белая сажа, графит и др. К искусственным минеральным наполнителям относятся портландцемент, шлакопортландцемент и т. п. Повышенной активностью обладает тонкоизмельченный алюминий, известный как алюминиевая пудра. В зависимости от кроющей способности ее разделяют на четыре марки от ПАК-1 до ПАК-4. К искусственным относятся также порошки чугунные, стальные, никелевые, а также стеклянная мука, рубленое стекловолокно, фарфоровая мука и др. Из органических наполнителей используют древесную муку, пробковую муку.

Волокнистыми наполнителями являются асбестовое волокно, древесное волокно, стекловолокно (главным образом, алюмоборо-силикатное), каменное (например, базальтовое) волокно, синтетическое (нейлон, вискоза и др.) волокно, хлопковые очесы, целлюлоз-а.

К листовым наполнителям относятся бумага, ткани (например, из джуто-кенафного волокна, стекловолокна с различными типами переплетения волокон и др.), картон обычный и асбестовый, древесный шпон (листы лущеной древесины толщиной 0,3—1,0 мм), металлические листы, сетки и др.

Отвердители — химические вещества, которые благоприятствуют отверждению мономеров или олигомеров, введенных в полимерные композиционные материалы в процессе их производства. К их числу относятся катализаторы (кислоты, соли основания), инициаторы (органические и неорганические перекиси), ускорители (например, ускорители вулканизации каучуков).

Пластификаторы — вещества, вводимые для снижения вязкости системы, снижения температуры стеклования полимера, повышения эластичности, морозостойкости, облегчения введения в полимер наполнителей и формуемости изделий. В качестве пластификаторов используют жидкие и смолообразные вещества, в том числе фталаты (дибутилфталат, диоктилфталат), фосфаты (трикрезилфосфат, трифенилфосфат), камфору, стеарат аммония и др.

Стабилизаторы — вещества, вводимые в пластические массы для предотвращения или торможения процессов деструкции или чрезмерного структурирования в

эксплуатационный период работы полимерных конструкций и изделий. Их разделяют на экранирующие и блокирующие. Экранирующие вступают во взаимодействие с реагентом деструкции быстрее, чем полимер, что защищает последний от разрушения. Блокирующие быстро реагируют на возникающие свободные радикалы соединений, возникающих при деструкции, и предотвращают дальнейшее разрушение или старение молекулярных цепей. К числу таких ингредиентов можно отнести амины, фосфаты, фосфиты, тиоэфиры и др. Следует отметить, что комплексный стабилизатор выбрать затруднительно и поэтому комбинируют их в зависимости от конкретных эксплуатационных сред, в которых работает полимерная конструкция. Стабилизаторы вводят обычно в количестве не более 2—3% от массы полимера.

Ингибиторы и замедлители — вещества, которые либо полностью превращают процессы полимеризации и поликонденсации, либо замедляют их скорость. Для этих целей используют гидрохинон, серу, ароматические амины, уротропин или гексаметиленetetра-мин и др.

Красящие вещества вводят в композицию для придания изделию необходимого колера. В производстве пластмасс используют неорганические пигменты — охру, мумию, сурик, умбру, ультрамарин, оксид хрома и др. и органические — нигразин, хризоидин. Светлые тона пластмассам придают, вводя белые пигменты: литопон, диоксид титана, оксид цинка и др.

Парообразователи — вспенивающие вещества для формирования ячеистой или пористой структуры материала. К наиболее распространенным порообразователям относятся твердые вспенивающие вещества — порофоры, которые при нагревании разлагаются с выделением газов. При обратимом термическом разложении они выделяют карбонат аммония, бикарбонат натрия, применяемые в совокупности, а при необратимом термическом разложении — азотосоединения, нитроазосоединения, сульфонилгидразиды. При химических реакциях выделяются углекислый газ, азот, аммиак; выделяются газы при реакции взаимодействия нитрита натрия с хлористым аммонием, металла (алюминия, цинка) с кислотами, вводимыми в полимерную композицию. К вспенивающим веществам относятся также жидкие порообразователи, выделяющие газы и образующие ячеистую структуру материала: бензол, изопентан. Имеются еще и газообразные вспениватели — воздух, инертные газы. Все газы, выделяемые в процессе формирования структуры, под давлением фиксируют поры в размягченном полимере,

Модификаторы — твердые, жидкие или газообразные вещества, под влиянием которых происходит направленное изменение свойств полимеров.

Модификаторы применяются минерального или органического состава, в частности, хлор, кислоты, природные битумы, низкомолекулярные каучуки, растительные масла, канифоль, полиэфиры, полиамиды, латексы и др. С их помощью модификации подвергают при необходимости полимеры линейной и разветвленной структуры. В результате процесса синтеза формируются полимеры иного состава и иных свойств, например, они приобретают ранее отсутствующую теплостойкость или способность растворяться в органических растворителях, переходить из вязко-эластичного состояния в твердое с повышенной прочностью и т. п.

Растворители — жидкие вещества, способные переводить в состояние раствора полимеры или некоторые другие компоненты пластмасс. Чем эффективнее растворитель, тем выше его растворяющая способность к данному полимеру, что оценивается по скорости растворения, минимальной вязкости смеси, понижению температуры раствора и др. Растворители особенно необходимы при производстве лаков, красок, клеев, мастик, полимербетонов и полимеррастворов. Кроме растворителей различают сходные по функции разбавители, способные растворять полимеры в присутствии активного растворителя или разбавлять ранее приготовленные растворы полимеров. Растворимость практически всегда возрастает с повышением температуры системы или концентрации аморфных участков. Содержание растворителя ограничивается определенным минимумом,

достаточным для выполнения технологических операций при отверждении полимера без помех.

В производстве пластмасс наиболее часто применяют растворители — бензин, керосин, уайт-спирит, бензол, толуол, ксилолсоль-вент каменноугольный; скипидар, окситерпеновый растворитель; метилхлорид, дихлорэтан и хлорбензол; спирты — метиловый, этиловый, бутиловый, изопропиловый; сложные эфиры — метил-, этил-, бутил- и изоамилацетат. Каждый из растворителей имеет свою функциональную направленность. Для повышения универсальности применяют комплексные растворители — смеси двух и более соединений. Все растворители огнеопасны и, как правило, ядовиты, требуют повышенной внимательности при их употреблении и хранении.

11.3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ

При изготовлении пластмасс и строительных материалов (изделий) из них осуществляются технологические операции, свойственные всем искусственным строительным конгломератам: подготовительные работы по активизации составляющих; дозирование компонентов и их перемешивание в смесительных аппаратах; формование изделий методами вальцевания (на каландрах), горячего прессования, литья под давлением, экструзии и др.

Вальцевание на каландрах — технологический передел, при котором размягченная композиция формуется в зазоре между вращающимися валками каландров, образуя ленту изделия, толщину и ширину которой можно регулировать. Такую технологию применяют для обработки поливинилхлоридных пластмасс при изготовлении пленок, рулонных материалов для пола и т. п. (рис. 11.6).

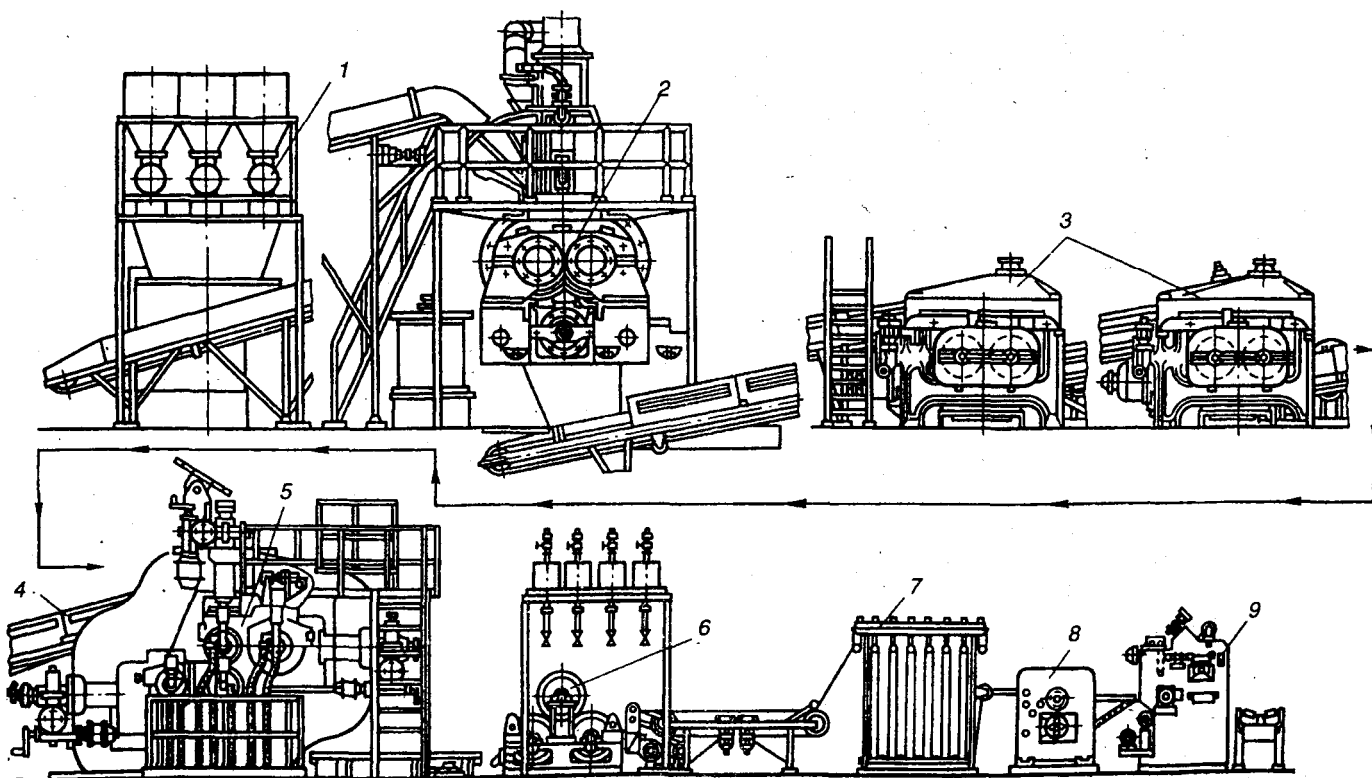


Рис. 11.6. Схема установки для производства поливинилхлоридного листа вальцово-каландровым способом:
1 — дозирование; 2 — роторный смеситель; 3 — двухвалковые вальцы; 4 — конвейер; 5 — каландр; 6 — охлаждающее устройство; 7 — комплектующее устройство; 8 — резательное устройство; 9 — упаковочный автомат

Кроме того, для изготовления рулонных материалов на тканевой подоснове используют промазной способ. Основными технологическими операциями изготовления изделий промазным способом служат: нанесение линолеумной массы на ткань, термообработка, уплотнение и охлаждение готовой линолеумной ленты.

Прессование — изготовление изделий в металлических пресс-формах. Материал (пресс-порошок), заполнивший форму, под действием теплоты и давления превращается в готовое изделие заданной конфигурации. При этом различают:

- а) метод прямого прессования, предусматривающий следующие технологические операции: загрузку готовой композиции в нагретую пресс-форму, собственно прессование, выдержку пресс-материала под давлением и выгрузку изделия (рис. 11.7);
- б) метод литьевого прессования (литье под давлением), при котором технологические операции осуществляют в такой последовательности: закрытие пресс-формы, установка

на ней загрузочной камеры с горячим пресс-материалом (на один цикл работы), создание давления на поршень загрузочной камеры для заполнения пресс-формы вязко-текучим пресс-материалом, поднятие загрузочной камеры и разъем пресс-формы с извлечением готового изделия (рис. 11.8).

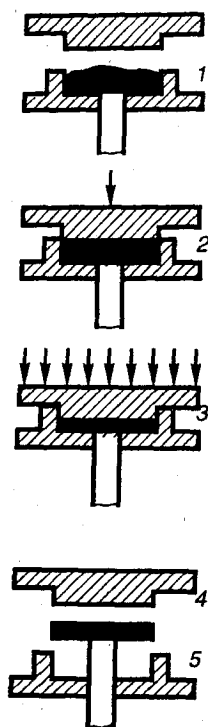


Рис. 11.7. Схема прямого прессования: 1 — загрузка пресс-материала; 2 — замыкание формы; 3 — формовка под давлением; 4 — размыкание формы; 5 — готовое изделие

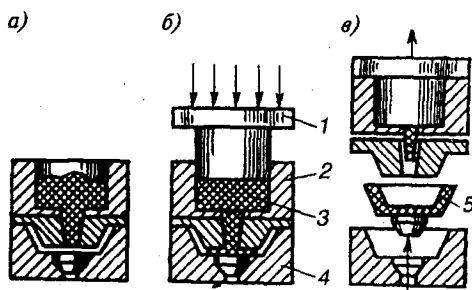


Рис. 11.8. Схема литьевого прессования: а — пресс-форма нагрета и закрыта; б — подача расплавленного материала в пресс-форму; в — разъем пресс-формы; 1 — пуансон; 2 — загрузочная камера; 3 — пресс-материал; 4 — пресс-форма; 5 — готовое изделие

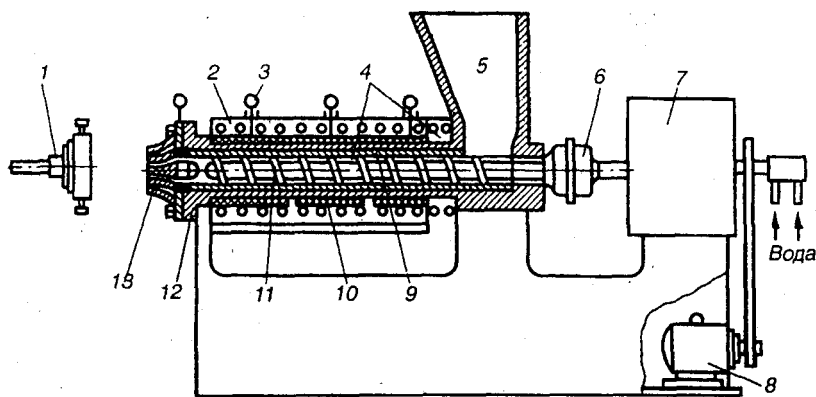


Рис. 11.9. Схема одночервячного экструдера:

1 — сменный мунштук; 2 — электронагреватели; 3 — термодатчики; 4 — каналы охлаждения; 5 — загрузочный бункер; 6 — эластичная муфта; 7 — редуктор; 8 — электродвигатель; 9 — втулка цилиндра; 10 — корпус экструдера; 11 — червяк; 12 — решетчатый дорн; 13 — экструзионная головка

Экструзия — процесс, при котором заданный профиль изделиям придается продавливанием размягченной исходной пластмассы через формообразующие устройства — экструзионную головку (рис. 11.9). С помощью таких шнековых экструзионных машин изготавливают погонажные изделия, трубы, пленки, линолеум для пола и др.

11.4. ОТВЕРЖДЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ И НАПОЛНЕННЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

На стадии изготовления изделий полимерное связующее вещество чаще всего находится в вязкотекучем (пластическом) состоянии, что позволяет придать такое же состояние и формуемой конгломератной смеси. Можно применять полимерный материал и в виде пресс-порошков. Придание полимеру и смеси в целом вязкотекучего состояния осуществляется осторожным нагреванием или введением растворителей, мономеров и олигомеров, применением полимеров в эмульгированном состоянии и т. п. При нагревании важно довести полимер до пластического состояния, не допуская его термического разложения. Особенно удобны линейные полимеры, температура перехода в пластическое состояние которых находится значительно ниже начала термической деструкции. Они способны неоднократно переходить в пластическое состояние с возвращением к твердоупругому состоянию с понижением температуры. Если, однако, в процессе формования изделия и возникает частичная термическая деструкция с выделением низкомолекулярных соединений, то предусматриваемое заранее введение стабилизаторов химически связывает продукты распада, предотвращает процесс дальнейшего разрушения материала. Чтобы не допускать термического разложения, нередко приходится снижать температуру и увеличивать давление при формовании изделий для лучшего заполнения форм. Некоторые полимеры сравнительно легко переходят в состояние повышенной текучести, особенно при введении в них добавочного вещества, именуемого пластификатором, или мягчителем. И тогда формовать изделия удобно литьевым способом под давлением.

Весьма ограниченной текучестью обладают термореактивные полимеры, хотя и они, являясь сравнительно низкомолекулярными, могут формоваться при повышенных температурах без пластификатора, но становятся после отверждения хрупкими, неплавкими и практически нерастворимыми. Поэтому к термореактивным полимерам нередко добавляется небольшое количество термопластичного полимера.

После окончания формования изделия, а часто еще в процессе формования, происходит самопроизвольное отверждение связующего полимерного вещества. Для повышения эффективности отверждения и улучшения качества готового полимерсодержащего изделия могут быть добавлены к смеси некоторые вещества специального назначения. Среди них — катализаторы и инициаторы (возбудители), например в виде кислот, солей сильных кислот, перекисей; отвердители (сера, перекись, диамины и др.); противокислители (оксиданты); ингибиторы (замедлители отверждения) и др. При необходимости в смесь вводят также порообразующие, красящие и другие вещества с целью получения у ИСК заданных свойств и структуры.

Вместо добавочных веществ большую пользу при отверждении некоторых полимеров приносят способы физического воздействия, например облучением или механическими напряжениями.

Процесс отверждения полимерных связующих веществ имеет свои специфические особенности, но тем не менее общие теоретические положения об отверждении всех вяжущих веществ (см. 2.3) распространяются и на них.

При производстве ИСК на основе термопластичных полимеров последние применяют обычно в виде мелких гранул, смешиваемых с дисперсным наполнителем и добавками. Полученную смесь нагревают, переводя в жидкое или пластичное состояние. Последующее отверждение термопластичных полимеров, например в результате охлаждения изделий из пластичной смеси, приводит к образованию твердой аморфной массы. В отвержденном состоянии эти полимеры сходны с переохлажденной жидкостью и подобно, например, силикатным стеклам не имеют постоянной точки плавления, чем отличаются от кристаллических тел. Объясняется это явление тем, что термопластичные полимеры состоят из макромолекул разной степени полимеризации и поэтому разных

размеров. При нагревании вначале плавится наиболее низкомолекулярная часть полимера, затем — средняя и позднее более высокомолекулярная часть его, т. е. плавление проходит в определенном температурном интервале.

При охлаждении жидкого или пластичного полимера формируется аморфная фаза в первую очередь за счет наиболее крупных линейных макромолекул, поскольку они являются малоподвижными в тепловом движении и затрудняют перемещение макромолекул меньшего размера, т. е. с меньшим количеством звеньев мономера в цепи. В процессе охлаждения полимера макромолекулы линейной структуры в условиях затрудненного пространственного перемещения не успевают расположиться для образования кристалла, чему не в малой степени мешает также очень большая сила сцепления (притяжения) между большими молекулами. В результате сохраняется аморфное состояние, которое полимер имел в вязкотекучем состоянии, но теперь уже при ослабленном тепловом движении макромолекул в связи с понижением его температуры.

С помощью силового воздействия, особенно на стадии формования изделий, например при растяжении, обжатии, при вытягивании из отверстия (экструзии), прессовании и т. п., можно добиться ориентирования линейных макромолекул или их отдельных частей в цепи по направлению действия механических сил. Тогда в полимере возникают пучки ориентированных и сближенных линейных макромолекул, чередующихся с аморфной массой. На рентгеновских снимках эти пучки похожи на ориентацию частиц в кристаллах, что дало основание полученным структурам полимера называть кристаллическими. Нередко такие образования именуют также кристаллитами. Оба этих названия отражают упорядоченность расположения некоторых частей цепочечных молекул, параллельно ориентированных между собой с наибольшим взаимосцеплением под влиянием межмолекулярных сил (рис. 11.10).

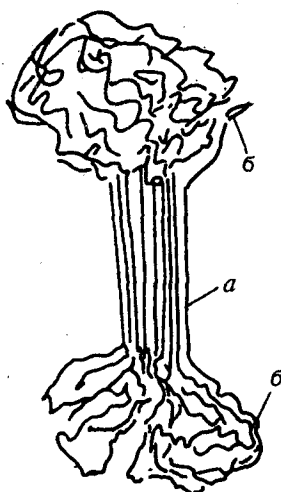


Рис. 11.10. Схема расположения участков цепей:
а — ориентированные молекулы; *б* — неориентированные молекулы (образуют соответственно кристаллическую и аморфную области структуры)

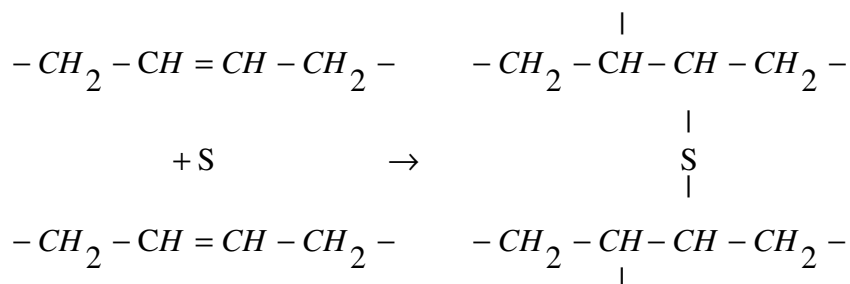
Следует отметить, что у термопластичных полимеров имеется постоянная тенденция к упорядочению и формированию кристаллитов, чему способствует некоторый избыточный запас внутренней энергии, характерный для тел в стеклообразном состоянии. Кристаллизация возможна как между цепями в виде пучков, так и в пределах одной цепи с образованием спирали или прямых складок. И хотя межмолекулярные силы между цепями или их частями в пучках не очень значительны, их многочисленность и равномерное распределение существенно повышают эффект отверждения по сравнению с аморфной структурой полимера, например полиэтилена, полипропилена и др. Возрастают также жесткость и прочность полимера, температура его плавления, устойчивость к

растворителям и прониканию жидкостей. При аморфной структуре с неориентированным, хаотическим расположением цепей полимер обладает относительной мягкостью, сохраняет признаки переохлажденного расплава, т. е. стеклообразного вещества.

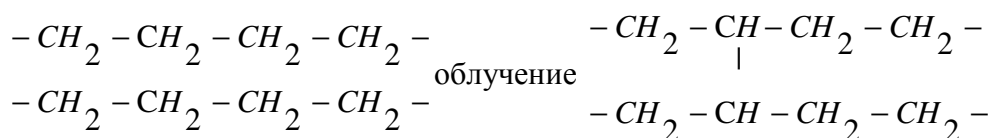
К завершающей стадии отверждения термопластичных линейных полимеров степень кристалличности, выражающая отношение масс кристаллической и аморфной фаз, увеличивается, особенно при механической обработке в горячем состоянии. Она достигает некоторого предела, характерного для данного полимера и технологических условий и режимов. Степень кристаллизации регулируют скоростью охлаждения, механической обработкой, термической обработкой (например, сухим прогревом) и т. п. Кристаллическая и аморфная части во многих полимерах могут быть разделены по их различной растворимости в некоторых растворителях. Так, например, кристаллический полипропилен нерастворим в жидком гептане, тогда как его аморфная часть легко в нем растворяется.

С повышением температуры под влиянием теплового давления степень кристалличности уменьшается, а после определенной температуры (точнее — интервала температур плавления) кристалличность исчезает. Возможно, однако, повторное образование кристаллитов при температурах более низких, чем температура плавления, но не ниже температур стеклования, когда линейный полимер переходит в упруготвердое состояние. Ниже условной температуры стеклования у отвердевшего полимера наступает хрупкость. В хрупком состоянии он способен разрушаться при приложении статической нагрузки без начальных деформаций.

Кроме кристаллизации как эффективного способа отверждения и упрочнения полимерного связующего вещества используют также способ химического превращения линейной структуры макромолекул в сетчатую — плоскостную или пространственную (трехмерную). Соответствующий процесс заключается в создании химических поперечных связей между цепями одинаковых линейных макромолекул с двойными связями. Это достигается с помощью небольшого количества отвердителя — веществ, способных вступать в реакцию с атомами макромолекулы по свободным валентностям. Достаточно типичным примером служит химическая связь двух макромолекул полибутадиена в одну новую макромолекулу сетчатой структуры с помощью серы как весьма активного отвердителя:



При отсутствии в макромолекуле двойных связей объединение двух макромолекул в одну возможно путем освобождения части валентностей с помощью облучения радиоактивным веществом или термоокислительной деструкцией, что видно на примере линейного полиэтилена с получением сетчатого:



Кроме облучения γ -лучами в технике применяют ускоренные электроны (β -лучи). Известно, что для проникновения в слой полимера толщиной 1 см требуется напряжение электронного пучка в 1 млн. Вт. Получаемый сетчатый полимер утрачивает термопластичность, у него повышаются твердость и теплостойкость.

По этому же принципу для отверждения линейный полипропилен обрабатывают перекисью водорода и некоторыми другими перекисями, полиизобутилен — серой, эпоксидное связующее вещество — диамином и т. п. Превращение линейного полимера в сетчатый происходит обычно на стадии обработки изделия после его формования и влечет за собой дальнейшее отверждение с повышением твердости, прочности и теплостойкости, потерю термопластичности, резкое снижение деформативности.

Во всех технологических приемах образования поперечных связей возникают химические связи, которые не зависят от ориентирования цепей. Скорость процесса химического «сшивания» быстро возрастает с повышением температуры, и в отличие от кристаллизации этот процесс является необратимым. При нагревании связи между цепями обычно разрываются, а полимер сетчатой структуры разрушается без заметного предварительного размягчения.

Отверждения и упрочнения полимеров можно достигнуть комбинированием способов кристаллизации и создания поперечных связей, что еще более повышает их жесткость и прочность.

Эффекта отверждения пластифицированных полимеров, обладающих повышенной эластичностью, достигают введением твердых порошкообразных наполнителей. Они переводят полимер в пленоч-но-ориентированное состояние, что приближает их к кристаллизационным структурам. В качестве наполнителей используют сажу, оксид кремния, оксид алюминия и др. Частицы наполнителя адсорбируют полимерные цепи и упрочняют их; цепи становятся более жесткими.

В результате процессов отверждения полимерных материалов с переводом связующего вещества в более термостабильное и ориентированное состояние, подобно кристаллизации аморфного вещества, количество последнего со временем уменьшается, тогда как количество ориентированного полимера возрастает. Это может быть выражено как снижение его фазового отношения c/ϕ и повышение степени кристалличности, если аморфную фазу представить как c , а кристаллическую — как ϕ .

Механизм отверждения термореактивных полимеров заключается в основном в процессе поликонденсации вязкожидких олигомеров, что, как отмечалось, сопровождается выделением побочных продуктов — низкомолекулярных веществ (воды, хлористого водорода, аммиака и др.). Они выделяются в газообразном состоянии, поскольку жидкость быстро испаряется или происходит сублимация, особенно при высоких температурах реакций. Поликонденсация является частным случаем реакций замещения, поэтому элементарный состав исходного сырья совпадает с элементарным составом продукта поликонденсаций.

Процесс поликонденсации — ступенчатый: макромолекулы сложного вещества образуются путем химического взаимодействия между функциональными группами в молекулах исходных веществ и на каждой ступени могут быть выделены из реакционной смеси сравнительно стабильные промежуточные продукты. Возросшая молекула всегда имеет те же концевые группы, что предыдущая, и может конденсироваться с молекулами исходного вещества. Последовательная конденсация с начальными реагентами или под влиянием нескольких промежуточных продуктов образует новое полимерное вещество.

Поликонденсация до высоких молекулярных масс термореактивных полимеров происходит в течение длительного времени, хотя нередко непосредственно перед формованием изделия добавляют ускорители отверждения.

На промежуточных ступенях могут быть получены вещества, которые при сравнительно незначительном количестве химических «сшивок» линейных макромолекул не успевают полностью утратить свойства плавкости и растворимости. Эти сравнительно еще низкомолекулярные вещества имеют вязкотекучее состояние и называются олигомерами, или термореактивными смолами. Они обладают подвижностью, сохраняют реакционную способность, которая позволяет с помощью дальнейшей термообработки перевести их полностью и необратимо в термореактивные высокополимеры. Последние приобретают

пространственную структуру. Во избежание самопроизвольного отверждения во время хранения к термореактивному полимеру иногда добавляют ингибитор.

Поликонденсация осуществляется в смесях компонентов, расплавах, растворах, эмульсиях на границе двух несмешивающихся жидкостей и т. п. В частности, эмульсионный способ поликонденсации позволяет получать полимеры с огромной молекулярной массой — до миллиона и более. Повышение температуры в определенных пределах благоприятствует ускоренному течению реакции поликонденсации, достижению равновесия и удалению побочных продуктов. Так, например, фенолоформальдегидный полимер теряет способность растворяться при обычной температуре за 8—10 мес. отверждения, а при 140—160°C за несколько минут с выделением летучих веществ. Кроме того, если добавить ускоритель (кислоту), то отверждение наступает при обычной температуре за 2—4 ч с выделением летучих веществ. Или другой пример: меламиноформальдегидный или мочевиноформальдегидный полимер теряет растворимость при обычной температуре отверждения за 1—3 мес и при температуре 130—160°C отверждается за несколько минут с выделением летучих веществ (первый признак реакции поликонденсации), при добавлении же ускорителя (солей сильных кислот) отверждение наступает при обычной температуре за несколько минут с выделением летучих веществ. Точно так же термореактивные ненасыщенные полиэфирные полиметакрилаты теряют растворимость при обычной температуре за 2—3 мес без выделения летучих, а при повышенной температуре (80—120°C) в присутствии инициатора (перекиси) отверждаются за несколько минут. Однако следует учитывать, что отверждение термореактивных смол сопровождается выделением теплоты от 250 до 550 кДж/кг. Так, например, максимум повышения температуры за счет экзотермии при отверждении фурфуролацетонового мономера (ФАМ) при катализаторе БСК (бензолсульфокислоты) наступает через 25—30 мин, а затем выделение теплоты уменьшается и практически полностью прекращается. Прекращение тепловыделения связано с завершением в основном химического превращения мономера в полимер, хотя процесс химической «сшивки» и упрочнения полимера и конгломерата на его основе может продолжаться под влиянием внешних тепловых факторов и диффузии химических реагентов из внешней среды.

Большую пользу при отверждении приносят некоторые наполнители, вводимые в отверждающуюся систему, поскольку на границе контакта полимера с поверхностью наполнителя возникают процессы взаимодействия. Молекулы полимеров адсорбируются на поверхности частиц наполнителя, создают сравнительно ориентированный микрослой толщиной до нескольких сотен ангстрем. Возможно появление и новой фазы на границе контакта под влиянием хемосорбционных процессов. Так, например, наполнители маршал-лит, андезит, кварцевая мука и другие проявляют особую высокую химическую активность по отношению к полиэфирным и фурапо-лым полимерам. В хемосорбционных процессах их взаимодействия участвуют карбонильные и гидроксильные группы полиэфирного, карбонильные и фурановые кольца фуранового полимера с образованием ковалентных и водородных связей. Полимер образует непрерывную пространственную сетку (трехмерную), а частицы наполнителя входят в эту сетку, создавая единую микроструктуру полимерного отвержденного вяжущего вещества. Вместе с тем наполнители снижают температуру саморазогрева смеси.

Таким образом, к моменту завершения ступенчатого процесса поликонденсации — отверждения термореактивного полимера — резко снижается количество олигомера как сравнительно аморфного, с еще недостаточно упорядоченной структурой вещества, но весьма возрастает количество вещества с пространственной структурой, в значительной мере стереорегулярной, к тому же частично ориентированной на поверхности активного наполнителя в пленочно-адсорбированном состоянии. Если небольшую часть сохранившегося олигомера на завершающей ступени отверждения принять за с, а большую часть трехмерного полимера за ф, то очевидно, что к моменту завершения отверждения полимера величина отношения с/ф стремится к минимуму. Как отмечалось выше, это

явление полностью соответствует отвердеванию других вяжущих веществ, изложенному в общей теории отвердевания ИСК.

11.5. РАЗНОВИДНОСТИ ИСКУССТВЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОНГЛОМЕРАТОВ И ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС

11.5.1. ПОЛИМЕРБЕТОНЫ И ПОЛИМЕРРАСТВОРЫ

Под полимербетонами подразумевают конгломераты, получаемые на основе синтетических смол, отвердителей и с применением в них химически стойких и совместимых со смолами наполнителей и заполнителей. Они предназначены для изготовления несущих и ненесущих, монолитных и сборных, всегда химически стойких строительных конструкций и изделий, а также для устройства полов, фундаментов, сливных лотков и др. Полимербетоны классифицируют по виду полимерного связующего вещества, средней плотности, химической стойкости, прочностным характеристикам. Целесообразно, по предложению В.В. Патуроева, разделять полимербетоны на две группы — термореактивные и термопластичные (рис. 11.11). Первая группа подразделяется на карбамидно-фенольные, полиэфирные, фурановые, полиуретановые и эпоксидные, вторая группа — на инденкумароновые и метилметакрилатные. По средней плотности каждый полимербетон из первой группы может быть сверхтяжелым при $3500\text{—}4000\text{ кг/м}^3$, тяжелым — $2200\text{—}2400\text{ кг/м}^3$, легким — $1600\text{—}1900\text{ кг/м}^3$ и сверхлегким — $400\text{—}500\text{ кг/м}^3$; каждый из второй группы — тяжелым и легким. Реально используют фурфуролацетоновую ФА или ФАМ, фурано-эпоксидную ФАЭД-20, насыщенную полиэфирную ПН-1 или ПН-63, унифицированную карбамидную КФ-Ж смолы, метилметакрилат ММ А (мономер) и др. Отвердителями могут быть: при использовании ФА или ФАМ — бензолсульфокислота БСК; ФАЭД-20 — полиэтиленполиамид ПЭПА; ПН-1 и ПН-63 — гидроперекись изопропилбензола ГЦ и ускоритель — нафтенат кобальта НК; КФ-Ж — соляно-кислый анилин; для мономера метилметакрилата (ММА) — система, в которую входят диметиланилин БМА и перекись бензоила. Содержание олигомер-полимерного компонента составляет от 10 до 200 кг на 1 м^3 бетона.

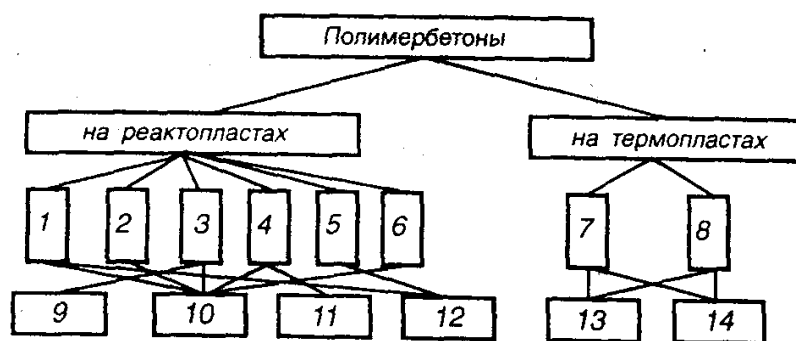


Рис. 11.11. Классификация полимербетонных конструкций (по В.В. Патуроеву): 1 — карбамидные; 2 — фенольные; 3 — полиэфирные; 4 — фурановые; 5 — полиуретановые; 6 — эпоксидные; 7 — инденкумароновые; 8 — метилметакрилатные; 9 — сверхтяжелые $\gamma=3,5\text{—}4$; 10 — тяжелые $\gamma=2,2\text{—}2,4$; 11 — легкие $\gamma=1,6\text{—}1,9$; 12 — сверхлегкие $\gamma=0,4\text{—}0,5$; 13 — тяжелые $\gamma=2,2\text{—}2,4$; 14 — легкие $\gamma=1,6\text{—}1,8$ (средняя плотность γ , г/см^3)

плотности каждый полимербетон из первой группы может быть сверхтяжелым при $3500\text{—}4000\text{ кг/м}^3$, тяжелым — $2200\text{—}2400\text{ кг/м}^3$, легким — $1600\text{—}1900\text{ кг/м}^3$ и сверхлегким — $400\text{—}500\text{ кг/м}^3$; каждый из второй группы — тяжелым и легким. Реально используют фурфуролацетоновую ФА или ФАМ, фурано-эпоксидную ФАЭД-20, насыщенную полиэфирную ПН-1 или ПН-63, унифицированную карбамидную КФ-Ж смолы, метилметакрилат ММ А (мономер) и др. Отвердителями могут быть: при использовании ФА или ФАМ — бензолсульфокислота БСК; ФАЭД-20 — полиэтиленполиамид ПЭПА; ПН-1 и ПН-63 — гидроперекись изопропилбензола ГЦ и ускоритель — нафтенат кобальта НК; КФ-Ж — соляно-кислый анилин; для мономера метилметакрилата (ММА) — система,

в которую входят диметиланилин БМА и перекись бензоила. Содержание оли-гомер-полимерного компонента составляет от 10 до 200 кг на 1м³ бетона.

Наполнителями размеров частиц менее 0,15 мм служат кварцевая, андезитовая и диоритовая мука, маршаллит, графитовый порошок и др. Их удельная поверхность должна быть не ниже 2500—3000 см²/г. Помол нередко совмещается с активацией поверхности путем введения добавок (модификаторов), хотя при длительном хранении обработанного порошка возможна потеря приобретенной активности за счет адсорбции реагентов из внешней среды. Среди наполнителей и своеобразных заполнителей могут быть и искусственные — стеклохолст, стекловолокно и др.

Связующее вещество и наполнитель образуют при их объединении наполненный полимер, составляющий матричную часть полимербетона. Заполняющую часть в нем формирует крупный и мелкий (песчаный) зернистый материал. В качестве крупного заполнителя используют кислотостойкие щебень или гравий, керамзит, аглопорит, шунгизит. Размеры зерен щебня должны быть до 50 мм, песка — до 5 мм, размеры частиц наполнителя — менее 0,15 мм.

При оптимальных структурах полимербетон следует общим закономерностям ИСК. На него распространяются общее (при реак-топластах) и обобщенное (при термопластах) уравнения прочности. При их использовании сначала определяют расчетную прочность наполненного полимера оптимальной структуры R^* при P^*/n с учетом параметров действующей технологии. Технология включает промывку (при необходимости), сушку, фракционирование заполнителей с последующим подбором плотной смеси и оптимизацией структуры бетона, приготовление равномерно перемешанной полимербетонной смеси. Последнюю обычно готовят в бетоносмесителях принудительного действия при температуре не ниже 15°C в зависимости от вида связующего и с учетом усадки. Сравнительно небольшая усадка (0,4—0,7%) наблюдается при отверждении полимербетона на основе эпоксидных смол. Применение полиэфирных смол сопровождается увеличением усадки до 2—3%. Выбор вида смолы зависит и от эксплуатационных условий; фенолоформальдегидную смолу применяют при повышенной влажности, эпоксидную — при повышенной агрессивности среды и больших статических и истирающих силовых воздействиях, полиэфирную — при наличии динамических (ударных) нагрузок, при контакте с нефтепродуктами, спиртами.

Уложенный слой полимербетонной смеси уплотняют вибрацией — виброрейкой или глубинным вибратором, возможно — катком. Поверхность пола дополнительно заглаживают. Для ускорения отверждения полимербетона при необходимости подвергают сухому прогреву при температуре 80°C. Важно учитывать возможность нагревания за счет экзотермических реакций и досрочного отверждения.

От обычного полимербетона отличают полимеррастворы, в которых отсутствует крупнозернистый заполнитель, а матричная часть равномерно и тонкослойно размещается на мелких зернах песка, формируя после уплотнения и отверждения плотный и прочный монолит.

Для использования полимербетонов и полимеррастворов в несущих конструкциях их армируют стальной, стеклопластиковой или стекловолокнистой арматурой. Наиболее изучен сталеполимербетон на основе фурфуролацетонного мономера ФАМ.

На рис. 11.12 показана технологическая схема заводского производства химически стойких сталеполимербетонных строительных конструкций, которые были использованы при строительстве гидрометаллургических цехов¹. Менее изучен полимербетон со стержневой стеклопластиковой арматурой, но полагают, что требуется ее предварительное напряжение, которое, однако, может под влиянием релаксации снижаться или вовсе снимается. обстоятельному изучению (В.И. Харчевников) подвергся полимерраствор с содержанием 53% кварцевого песка, 16% андезитового наполнителя и

¹ Патуроев В. В. Стеклополимербетонные строительные конструкции М Строиздат, 1972.

2—8% по массе стекловолоконной арматуры ⁷ алюмоборитного состава. С учетом действия закона створа при оптимальных структурах была разработана ускоренная методика подбора оптимального состава стекловолоконного полимербетона на основе ФАМ и полиэфирных смол с использованием соответственно в качестве отвердителя — бензолсульфокислоты (3%), инициатора — гидроперекиси изопропилбензола (1,5%) и ускорителя — нафтената кобальта (2,0%).

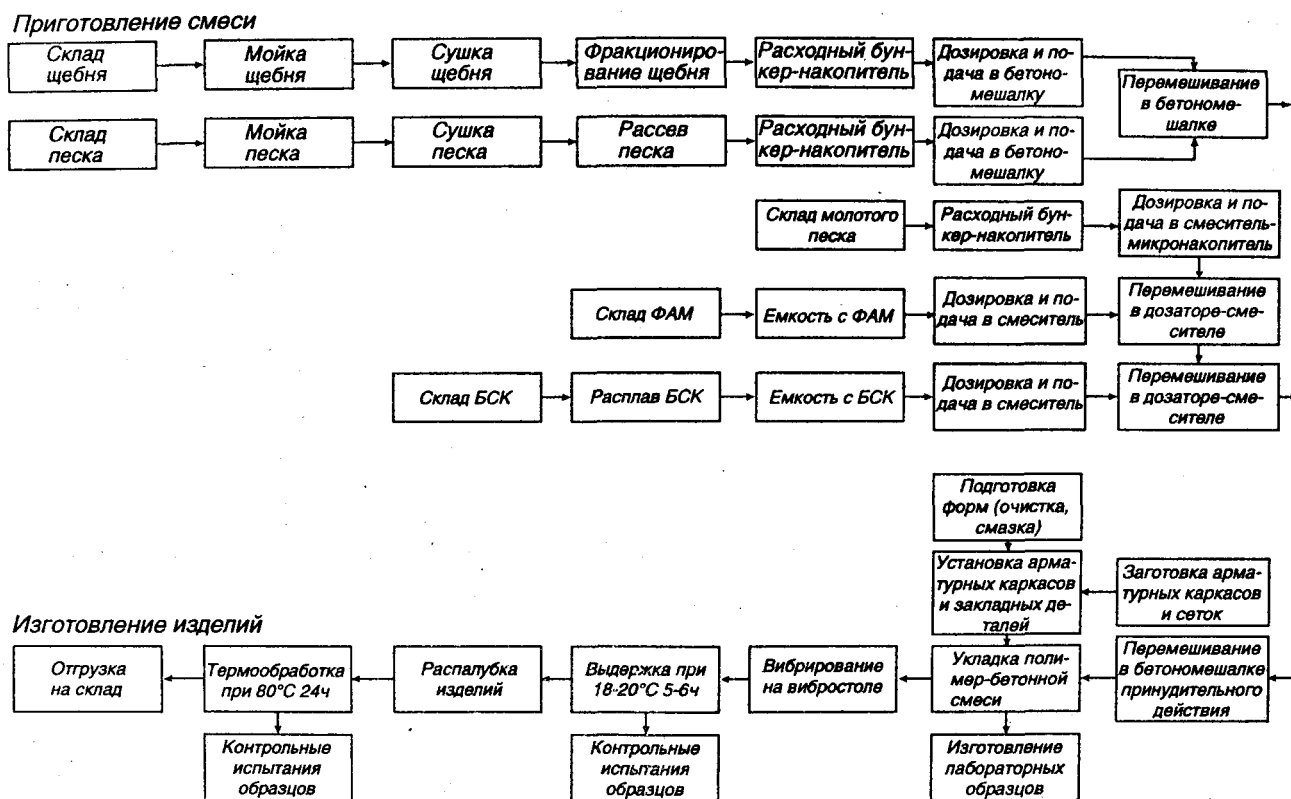


Рис. 11.12. Схема заводского изготовления химически стойких сталеполимерных строительных конструкций

Рекомендованные показатели качества стекловолоконных полимербетонных изделий на основе ФАМ при ориентированном армировании и хаотическом различаются. В первом случае предел прочности при растяжении равен 65 МПа, при сжатии — 64 МПа, «чистом изгибе» — 81 МПа, скалывании (сдвиге) — 7 МПа, во втором — соответственно 5; 82; 11; 9. Средняя плотность в первом случае равна 1,71, во втором — 1,60 г/см³; теплопроводность — 0,7 Вт/(м·К); линейная усадка — 0,5%.

В целом следует отметить, что полимербетонные и полимеррастворы на основе синтетических смол могут быть высокого качества по прочностным показателям, воздухо- и водонепроницаемости, химической и радиостойкости и др. Но эти ИСК имеют и недостатки: сравнительно низкую теплостойкость (100—180°C) и высокие усадочные деформации. Однако эти недостатки не имеют большого значения при массовом производстве декоративно-отделочных плиток и некоторых других изделий.

В последние годы НИИЖБом предложены сухие гидротехнические смеси проникающего действия. В частности, следует отметить ряд герметических составов (марок): быстротвердеющие — ликвидируют протечки, водоостанавливающие — высушивают стены, противогрибковые — подавляют грибковые образования, универсальные для строительных и ремонтных работ.

Полимербетонные, названные искусственным мрамором, представляют собой высоконаполненную полиэфирную смолу (18—21% смолы и 78—81% наполнителя). В качестве наполнителя обычно применяют кварцевый песок или другой неактивный минеральный компонент. Изделия изготовляют методом заливки в формы с очень малыми

усадками; применяют как плитку для пола, облицовки стен, в качестве высокодекоративных изделий, элементов фасадов и крыш, подоконников, оконных рам и др. Этот материал обладает высокими механическими и физико-химическими свойствами — высокой сопротивляемостью воздействию агрессивных сред и истираемости.

11.5.2. ПОЛИМЕРНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Кроме полимербетонов и растворов, рассмотренных выше, на 1 основе полимеров изготавливают другие материалы и изделия со (сходными, конгломератного типа микро- и макроструктурами. По функциональному назначению можно выделить из этой группы материалы для: полов; ограждающих и несущих (кроме бетонов) конструкций; кровли, гидроизоляции и герметизации; тепло- и звукоизоляции; санитарно-технического оборудования и труб; отделочных материалов и покрытий, трубопроводов вспомогательного назначения.

Материалы для полов различают рулонные и плиточные.

Рулонные материалы бывают с теплозвукоизоляционной основой и без основы: поливинилхлоридные, алкидные (глифталевые), коллоксилиновые (нитроцеллюлозные), резиновые. К наиболее эффективным и чаще применяемым относятся *поливинилхлоридные линолеумы*, изготавливаемые тремя основными способами: промазным, вальцово-каландровым и экструзионным.

Для изготовления поливинилхлоридного линолеума промазным способом в качестве связующего вещества применяют эмульсионный поливинилхлорид. Надежным пастообразующим свойством обладает поливинилхлорид марок ПВХ-Е62 и ПВХ-Е70П в присутствии пластификатора, например дибутилфталата или диок-тилфталата. Полученное пастообразное связующее смешивают с наполнителем — тонкоизмельченным известняком, мелом, тальком и др. В качестве красителя может быть применен органический (фталоцианин) или минеральный пигмент (сурик, мумия, оксид хрома, литопон), ультрамарин и др. Подоснова — джутовая, войлочная или иная ткань.

Технология производства линолеума промазным способом состоит из следующих операций (рис. 11.13): подготовка сырья, приготовление пигментной пасты; линолеумный замес с получением грунтопромазочной массы; нанесение линолеумной пасты на перемещающуюся подоснову; термообработка и желирование пасты на подоснове; обрезка, сортировка, упаковка. Каждую операцию строго регламентируют, что позволяет получать необходимое качество и однородность готовой продукции. Промазной линолеум на тканевой подоснове выпускают в виде рулонов длиной 12, шириной 1,4—1,6 м, толщиной 2—2,5 мм. Его наклеивают на бетонное, деревянное основания или на настил из древесностружечных и древесноволокнистых плит. Промазной линолеум на войлочной подоснове выпускают также либо в виде рулонов длиной 6—12 м и толщиной 4,5—5,5 мм, либо в виде сварных ковров, сматываемых для транспортирования в рулоны. Этот линолеум укладывают на основание насухо, без приклеивания, а сварной шов из двух полотнищ прикатывают роликом и выравнивают холодным утюгом. Сваривают ковровые полотнища с помощью специального сварочного агрегата.

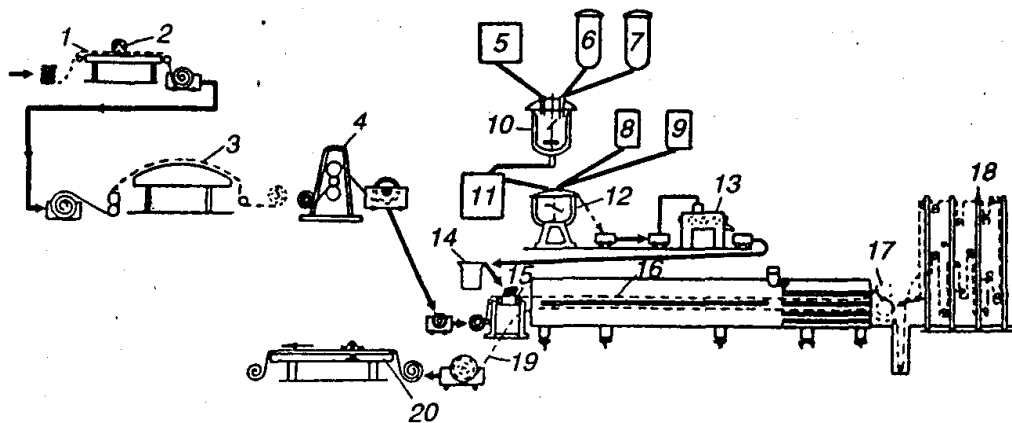


Рис. 11.13. Последовательность операций по производству поливинилхлоридного линолеума промазным способом:

1 — стол для измерения и контроля ткани; 2 — счетчик метража; 3 — стол для ручной очистки ткани; 4 — гладильный каландр для ткани; 5 — бункер для полихлоридной смолы; 6 — емкость для пластификатора; 7 — емкость для разбавителя; 8 — бункер для наполнителя; 9 — бункер для пигмента; 10 — смеситель для приготовления пасты; 11 — камера для вызревания пасты; 12 — Z-образная мешалка; 13 — краскотерка; 14 — емкость для грунтомассы; 15 — грунтовальная машина; 16 — желировочная камера; 17 — холодильные барабаны; 18 — магазин запаса; 19 — готовая продукция; 20 — кромкорезательная установка

Технологические операции производства линолеума вальцово-каландровым способом (рис. 11.14) осуществляются в зависимости от принятой разновидности выпускаемой продукции: бесосновный однослойный линолеум, бесосновный многослойный и основный (на войлоке). Изготовление бесосновного однослойного линолеума включает: первичное смешение отдозированных по составу при температуре 60—80°C компонентов; вторичное смешение и пластификацию с подъемом температуры до 140—150°C; пластификацию массы переработкой ее на вальцах, подогреваемых до температуры 120—140°C; вторичное формование полотна на четырех валковых каландрах; охлаждение готовой продукции на холодильном барабане, поверхность которого охлаждается водой до 40°C; подачу на намоточный станок.

При выпуске бесосновного многослойного линолеума технология включает: изготовление лицевой пленки; изготовление пленки для нижнего слоя (или нижних слоев); склеивание (дублирование) пленок. Для изготовления пленок используют суспензионный поливинилхлорид, наполнители, пигменты, пластификаторы и стабилизаторы. Перемешанная масса поступает на каландр и далее на охлаждающий барабан. Толщина линолеума обусловлена зазором между двумя последними валками. Соблюдается определенный термический режим на стадии прохождения формуемой массы.

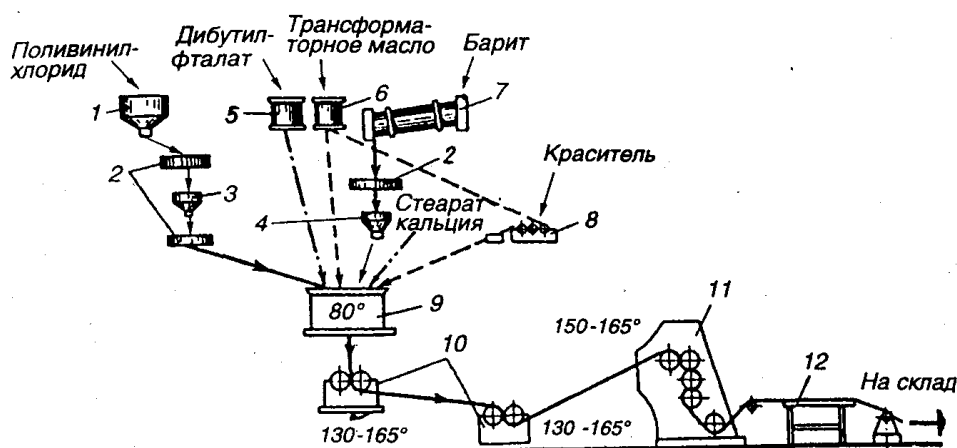


Рис. 11.14. Технологическая схема производства поливинилхлоридного линолеума вальцово-каландровым способом:

1,3 — бункеры для поливинилхлоридного полимера; 2 — вибрационные сита; 4 — бункер для барита; 5 — мерник дибутилфталата; 6 — мерник трансформаторного масла; 7 — сушильный барабан; 8 — краскотерка; 9 — Z-образная мешалка; 10 — смесительные вальцы; 11 — каландр; 12 — браковочный стол

Однослойный и многослойный линолеум выпускают в рулонах длиной 12 м и шириной 1,5—1,6 м, толщиной 1,6—2,0 мм. Истираемость 0,05 г/см².

Технологические операции при производстве линолеума экструзионным способом слагаются в следующей последовательности: подготовка сырья; приготовление смеси для верхнего и для нижнего слоя; экструдирование смесей с получением двухслойного полотна. Белый порошкообразный полимер и мел как наполнитель в определенном массовом соотношении (по проектному составу), интенсивно перемешанные в двухступенчатом смесителе в течение 2—2,5 мин (для лицевой массы) и 5—5,5 мин (для массы нижнего слоя), при температуре 40—80°C соединяют с пластификатором (обычно диоктилфталатом). После внесения других компонентов (стабилизатора — чаще

стеарата свинца; пигмента необходимого колера и интенсивности) при температуре 120°C общую смесь перемешивают в течение 4—5 мин (лицевой слой) и 6—7 мин (нижний слой), а затем полученную массу перемещают во вторую ступень смесителя и охлаждают. Затем массу вновь перемещают при температуре 40°C в течение 7 мин (лицевой слой) и 10—11 мин (нижний слой).

Приготовленные смеси пневмотранспортом переводятся в емкости, расположенные над экструдерами. В экструдерах смесь равномерно прогревается и направляется к подогретому (тэнами) мундштуку для изготовления двухслойного линолеума. Завершающая операция — термообработка полотна при температуре 130°C для полной релаксации напряжений.

Коллоксилиновый или нитроцеллюлозный линолеум. Основным компонентом его служит коллоксилин — один из видов нитрата хлопковой целлюлозы с содержанием азота в пределах 10,7—12,5%. В целях удешевления сырья можно добавлять до 30% древесной нитроцеллюлозы. Следует отметить, что в абсолютно сухом состоянии коллоксилин взрывоопасен (от удара), а при влажности до 25% он не горюч и тогда можно применять его в линолеуме. В качестве наполнителей используют дешевые минеральные вещества — гипс, глину, пиритные огарки, хризотилковый асбест, а пластификаторов -L дибутилфталат, трикрезилфталат или их вместе. Кроме того, применяют стабилизатор, краситель, антипирен (обычно борную кислоту).

Технологические переделы чередуются в следующей последовательности: дозирование сырьевых компонентов и приготовление ли-нолеумной массы. При этом влажность коллоксилина колеблется в пределах 25—45% и тогда он не только взрывобезопасен, но и не горюч. Варят массу в водной среде при температуре 60—70°C в течение 2—4 ч, причем коллоксилин набухает в пластификаторах, образуя однородную массу. С помощью центрифуги из массы отжимается вода до 16—20%-ной остаточной влажности. Следующая операция — смешение полученной массы с наполнителем, пигментом и антипиреном в течение 45—60 мин. Затем линолеумную массу вальцуют, при этом происходит желатинизация и гомогенизация массы, что определяет в основном качество готовой продукции. Чем дольше вальцуется масса, тем лучше и полнее происходит смешение ее компонентов и желатинизация. «Созревшее» полотно имеет ровную, плотную и гляцевитую поверхность. Окончательная отделка и калибровка полотна линолеума производится на двух последних вальцах с последующим охлаждением на холодильных барабанах. Затем полотно в течение 24 ч выдерживают на специальном стеллаже. В результате выдержки происходит продольная и поперечная усадка. Заключительные операции — обрезка кромок, раскрой по длине, упаковка.

Технические свойства коллоксилинового линолеума: средняя плотность, г/см³: марки НЛП 1,76—1,85, марки НЛПП 1,8—1,9, марки НЛ-П J, 8—1,9. Цвет соответственно темно-коричневый, темно-красный и светло-коричневый. Предел прочности при разрыве для всех марок не менее 2,5 МПа, водопоглощение не более 6% (по массе), трудногорючие, твердость (по ТШР-2) не более 0,3.

Коллоксиалиновый линолеум применяют для покрытия полов по твердому и подготовленному основанию в производственных помещениях, в жилых домах и общественных зданиях.

Глифталевый (алкидный) линолеум изготавливают на джутовой, тканевой основе с применением в качестве сырья натуральных растительных масел (льняного, хлопкового, подсолнечного, соевого, тунгового) в количестве до 22—23% от массы линолеума. Наиболее прочную пленку формируют льняное и тунговое масла. В настоящее время найдены заменители растительных масел, что повышает реальность развития производства глифталевого линолеума. Кроме полимеризованных масел требуются глицерин, фталевый ангидрид, сиккативы, пигменты и большое количество наполнителя

(до 45% от массы линолеума). В качестве наполнителя обычно используют пробковую и древесную (хвойных пород) муку (в смеси).

Технологические переделы следуют в определенном порядке: окисление и полимеризация (оксиполимеризация) растительных масел; приготовление модифицированного глифталевого полимера как основного связующего вещества; приготовление линолеумной массы; каландрирование линолеума; вызревание линолеума в сушильных камерах; разрезка, разбраковка и упаковка линолеума. Модифицированный глифталевый полимер содержит: фталевого ангидрида — 26%, глицерина — 14%, тунгового масла — 6% и оксидированные кубовые остатки¹. Линолеумную массу получают введением в модифицированный глифталевый полимер наполнителей (всего свыше 50%), красителей (12%), парафина (2%). После обработки на валках и в смесителе масса приобретает однородность и необходимую пластичность. Затем масса проходит ряд последовательных операций на большой и малой смесительно-резательных машинах, скребковых валках и поступает на каландры. На каландрах при температуре 85°C масса наносится на джутовую ткань слоем заданной толщины и охлаждается на холодильном барабане. Подготовленный линолеум подают в сушильную камеру. В течение 5 суток появляются необходимая упругость и стойкость на истирание.

Глифталевый линолеум выпускают шириной полотна 180—200 см, толщиной 2,5—5 мм, длиной рулона 20 м. Истираемость его не больше 0,06 г/см², твердость по шариковому твердомеру ТШР-2 не более 0,7, упругость не менее 50%, водопоглощение не более 6%. Его используют для устройства полов в промышленных, общественных и жилых помещениях.

Резиновый линолеум (релин) — двухслойный рулонный материал, верхний слой которого изготовляют из синтетических каучуков, наполнителей и красителей и добавочных веществ различного назначения. Нижний слой формируют из смеси старой дробленой резины и битума. В качестве наполнителя используют белую сажу — силикагель, древесную муку, асбест, каолин, мел. Для вулканизации резиновых смесей вводят порошкообразную серу и ускорители реакции — тиурам или дифенилгуанидин (тоже в виде порошка). Усиливают действие указанных катализаторов введением оксида цинка. Верхний и нижний слои релина изготовляют отдельно, а затем их соединяют (дублируют) с одновременной вулканизацией каучука и сырой дробленой резины. Вулканизация, как известно, требуется для повышения прочности, твердости, эластичности, тепло- и морозостойкости, снижения растворимости в органических растворителях как каучука, так и регенерированной с «мягчителем» (маслом) старой резины.

Производство релина складывается из следующих основных операций: изготовление верхнего слоя; изготовление нижнего слоя; дублирование (склеивание) слоев и вулканизация; обрезка, разбраковка и упаковка.

Релин выпускают в виде рулонов длиной 12 м, шириной 1,4—1,6 м, толщиной 3—5 мм, с различной расцветкой. Свойства: водопоглощение за 24 ч — не более 2%, истираемость — 0,05 г/см², упругость — не менее 50%.

Выпускают релин не только безосновный, но и на теплой пористой основе, хотя и реже.

Кроме линолеума к рулонным изделиям для пола относятся ковровые материалы. Их укладывают в помещениях повышенного класса вместо линолеума. Теплозвукоизоляционной основой ковра служат поливинилхлорид, полиуретан или вспененный латекс. Для изготовления верха ковра применяют синтетические волокна. Из них получают тканые и нетканые ворсовые покрытия. Высота ворса 4—8 мм, толщина основы 2—8 мм. Ворс либо, наклеивается на основу, либо основа наносится в жидком виде на ворс. Чаще других используют ворсолин и материал на пенола-тексной основе.

¹ Кубовые остатки производства синтетических жирных кислот получают при окислении парафинов. По внешнему виду — желеобразная масса. Содержат свыше 85% водонерастворимых жирных кислот.

Ворсолин является нетканым материалом из двух слоев. Верхнее покрытие — из ворсовой пряжи, получаемой из полипропиленовых или полиамидных волокон; основа — поливинилхлорид эмульсионной полимеризации; пластификатор — диоктилфталат или дибутил-фталат. Технологические операции состоят из получения поливинилхлоридной пасты, изготовления петель из ворсовой пряжи на петлеформирующей машине, формирования ковра. Выпускают в рулонах длиной 6 м, шириной 0,7 м и толщиной 5 мм. Этим синтетическим материалом устраивают сплошные покрытия полов в общественных (библиотеки, читальные залы, театры и др.) и жилых зданиях. Для этого ковры сваривают или склеивают в полотнища размером на комнату.

Материалы на пенолатексной основе — двухслойные ворсовые ковры. Верхний слой — синтетическая ткань с капроновым ворсом, нижний — губка из вспененного натурального латекса, имеющего квалитексом и представляющего собой однородную жид-кость молочного цвета. Вулканизатором служит сера. В качестве добавок используют пенообразователи, гидрофобизаторы, анти-септики и др. Технология состоит из следующих переделов: приготовление латексной смеси; приготовление добавочных смесей; вспенивание латексной смеси; разлив пены на движущуюся ткань; желатинизация латекса и вулканизация основы при прохождении через термокамеру; промывка ковра; сушка; обрезка кромок; свертывание в рулоны и упаковка ковра в бумагу. Используют для покрытия полов в зданиях.

Ковровое поливинилхлоридное покрытие «Ковроплен» — рулонный дублированный материал. Состоит из двухслойной нетканой основы с печатным рисунком и прозрачной поливинилхлоридной пленки. «Ковроплен» выпускают в рулонах длиной полотнища 15 м, шириной 1,2 и 1,5 м при толщине ковра 4,5 мм. Используют для покрытия полов в жилых помещениях, дорожек в коридорах и холлах общественных зданий.

Рулонные линолеумные и ковровые покрытия, выпускаемые отечественными заводами, гигиеничны, износоустойчивы и долговечны.

Плиточные материалы, изготавливаемые на основе полимеров с наполнителями, пластификаторами и красителями, получили широкое применение в строительстве. Плитки по сравнению с рулонными материалами имеют ряд преимуществ. Они могут быть квадратными, прямоугольными и фигурными. Многообразие форм и цвета плиток создают широкие возможности для художественной отделки пола. К недостаткам плиток следует отнести сниженную гигиеничность и недолговечность пола вследствие большого числа швов.

К плиточным полимерным материалам для полов относятся плитки поливинилхлоридные, кумаронополивинилхлоридные, кумароно-битумные, фенолитовые, резиновые, древесностружечные и др.

Поливинилхлоридные плитки вырубает металлическим штампом из полотнищ полимерной композиции. Их применяют для покрытия полов в помещениях жилых, производственных и общественных зданий, где требуется архитектурная отделка пола. Плитки могут быть одно- и многоцветными с гладкой или тисненой лицевой поверхностью. Наиболее ходовой размер квадратных плиток 300х300 мм при толщине 1,5; 2,0 и 2,5 мм. Они характеризуются следующими показателями физико-механических свойств: истираемость — не более 120 мкм (потеря в массе при истирании не более 0,05 г/см²); водопоглощение — не более 1,0%; твердость по шариковому твердомеру — не более 0,3 мм. Поливинилхлоридные плитки могут быть также прессованными («Превинил») для покрытия полов в общественных зданиях, магазинах и фойе зрелищных предприятий.

Кумаронополивинилхлоридные и кумароновые плитки производятся на основе поливинилхлоридного и кумаронового полимеров. По свойствам и применению они мало отличаются от обычных поливинилхлоридных плиток. Покрытия полов достаточно гигиеничны, химически- и водостойки и широко используются в помещениях с повышенным режимом влажности.

Фенолитовые плитки изготавливают на основе фенолоформальдегидного полимера, отвердителя и порошкообразных наполнителей — талька, каолина, слюды, древесной муки и др. Из составляющих компонентов получают пресс-порошок, который затем уплотняют на специальных прессах в плитки размером 150x150 мм, толщиной 4—6 мм. Фенолитовые плитки имеют высокую механическую прочность и устойчивость к воздействию большинства минеральных и органических кислот. Эти плитки отличаются повышенной теплостойкостью, малым водопоглощением. Потеря в массе при истирании таких плиток не превышает $0,03 \text{ г/см}^2$, а водопоглощение через 24 ч составляет не более 0,1%. Они могут быть использованы для покрытия пола и облицовки стен.

Резиновые плитки изготавливают методом прессования резиновых смесей на основе каучуков и резиновой крошки. Они могут быть одноцветными с рифлениями на лицевой стороне и ребристой обратной поверхностью. Плитки выпускают размерами 510x510x26 мм. Предназначаются для отделки полов производственных зданий.

Древесностружечные плиты — листовые материалы, получаемые горячим прессованием органических наполнителей (древесной стружки), обработанных синтетическими полимерами. В качестве полимеров применяют карбамидные и фенольные связующие вещества. Они удовлетворяют необходимым требованиям по водостойкости, отверждению при термообработке массы, прочно и устойчиво скрепляют частицы древесины между собой. Фенольные полимеры более водостойкие, но они дороже карбамидных и менее надежны в экологическом отношении, поэтому чаще используют карбамидные полимеры марок МФ-17 и МФ-20. Они бесцветны, малотоксичны и быстро отверждаются при температуре 100°C . Их расход определяется в лаборатории, но обычно составляет 8—12% массы плиты. Древесина для получения стружки может быть практически любой, как хвойной, так и лиственной, но для верхних слоев плиты предпочтительнее мягкие и легкие породы, тогда плиты получаются плотнее и прочнее. В массу добавляют антисептики, например буру ($\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), аммонийную соль серной кислоты $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ или фосфорной кислоты $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$. Для улучшения качества в плиты вводят гидрофобизирующие добавки, например водно-парафиновую эмульсию.

Для покрытий полов применяют трехслойные плиты марки П-3 длиной 2,44; 2,75; 3,50; 3,66 и 5,50 м, шириной от 1,22 до 2,44 м, толщиной 10—24 мм.

Древесностружечные плиты должны удовлетворять следующим техническим требованиям: средняя плотность — 800 кг/м^3 , предел прочности при статическом изгибе — не менее 25 МПа, водопоглощение — не более 15%. Полы из плит марки П-3 устраивают в жилых и административных помещениях с нормальным влажностным режимом эксплуатации. По плитам однослойным выстилаются мастичные монолитные полы или линолеум.

Древесноволокнистые сверхтвердые плиты СМ-500 изготавливают прессованием молотой древесной массы, обработанной полимерами, чаще всего фенолоформальдегидными, с добавками высыхающих масел и некоторых других компонентов. Плиты выпускают длиной 1,2 м, шириной 1,0 м и толщиной 5—6 мм. Полы из таких плит настилают в жилых помещениях и интерьерах общественных зданий.

11.5.3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ САНИТАРНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБЫ

Санитарно-технические изделия из пластмасс по сравнению с металлическими дешевле и легче. При относительно малой средней плотности они отличаются высокой механической прочностью и коррозионной стойкостью.

Для производства санитарно-технического оборудования используют в основном пластмассы, получаемые с применением ПВХ, полиэтилена и других термопластов, карбамидных и других полимеров. Следует отметить, что изделия на основе мочевиноформальдегидных (карбамидных) полимеров могут быть светлых тонов, в том числе и белого цвета.

Из пластмасс изготавливают ванны, умывальники, раковины, душевые кабины, вентиляционные и радиаторные решетки, а также мелкие детали для оборудования кухонь, моечных и других помещений санитарной техники.

Трубы из пластических масс вследствие ряда преимуществ получили широкое применение в строительстве. Их укладывают при сооружении водопроводных и канализационных сетей, ирригации и т. п. Благодаря высокой эластичности они не разрушаются при ударах и замерзании транспортируемой жидкости. Возможность изготовления длинноразмерных труб позволяет сократить число стыков, упростить соединения и удешевить монтаж трубопровода. Наиболее широкое распространение имеют трубы из полиэтилена и поливинил хлорида, а также стеклопластиковые.

Полиэтиленовые трубы изготавливают методом экструзии из полиэтилена высокого и низкого давления. Они обладают незначительным влагопоглощением, высокой стойкостью к кислотам и щелочным средам, к воздействию масел и многих растворителей. Отличительной особенностью является высокая морозостойкость, позволяющая эксплуатировать их в интервале температур от -80 до $+60^{\circ}\text{C}$.

Пластические свойства полиэтилена дают возможность изготавливать трубы большой длины (до 300 м) и наматывать их на специальные барабаны для транспортирования и укладки. Полиэтиленовые трубы выпускают различных диаметров — от 13 до 150 мм; их рассчитывают на рабочее давление до 1,2 МПа. Они легко свариваются в струе горячего воздуха, поддаются механической обработке. Их можно резать, строгать, точить, сверлить, фрезеровать и, как отмечено, сваривать (но не склеивать, так как к поверхности полиэтилена клей практически не пристает).

Поливинилхлоридные трубы изготавливают из поливинилхлорида, а точнее — из винипласта. Так называют поливинилхлорид после внесения в него стабилизатора для химического связывания выделяющегося при нагревании хлористого водорода, а также пластификатора (мягчителя). Стабилизатором служит свинцовый глет, а пластификатором — стеарин, трансформаторное масло и др. В его состав для изготовления труб входят 1 кг свинцового глета, 2 кг стеарата кальция и 0,2 кг трансформаторного масла на каждые 100 кг поливинилхлорида. Получаемые трубы — химически стойкие, но имеются и некоторые ограничения при контакте с ароматическими углеводородами, азотной кислотой концентрацией свыше 50% и др.

Трубы из винипласта могут быть с внутренним диаметром от 6 до 160 мм с толщиной стенок 2—8 мм и рассчитаны на рабочее давление до 0,6 МПа. Длина труб от 1,5 до 3,0 м. Их свойства в значительной мере предопределяются исходным винипластом. Соединение винипластовых звеньев в трубопроводы может легко осуществляться с помощью фланцев и накладных гаек, а также путем сварки в струе горячего воздуха. Однако наиболее надежные соединения труб получают склеиванием. Наиболее распространенным клеем служит 15—20%-ный раствор перхлорвинила в ацетоне или метилхлориде.

Трубопроводы из винипластовых труб широко используют для транспортирования агрессивных жидкостей и газов, а также для монтажа водопроводных и канализационных

сетей. Эксплуатационные качества таких сетей резко снижаются при отрицательных температурах, если не обеспечена надежная теплоизоляция.

Стеклопластиковые трубы изготавливают из полиэфирных смол со стекловолокнистым наполнителем. По сравнению с другими видами труб из пластических масс стеклопластиковые отличаются более высокой коррозионной стойкостью и повышенной механической прочностью, способностью выдерживать рабочие температуры до 150°C, тогда как полиэтиленовые — не выше 90°C, поливинилхлоридные — не выше 60°C, а под напором — до 40°C.

Трубы из органического стекла (полиметилметакрилата) обладают рядом ценных качеств — отсутствие запаха, высокая прочность не влияют на вкус транспортируемой жидкости и др. Это весьма благоприятствует использованию таких труб в пищевой промышленности, а также в медицинской. Однако они пока не получили массового распространения вследствие нерешенных вопросов в их технологии.

Трубы канализационные, оболочки для силовых кабелей с повышенной огнестойкостью, а также пожаробезопасные отделочные материалы для полов, стен и др. изготавливают из супернаполненных пластмасс со степенью наполнения термопластов (полиэтилена, полистирола и др.) до 90% от их массы минеральными наполнителями.

11.5.4. ОТДЕЛОЧНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Отделочную продукцию из полимеров можно разделить на следующие группы: материалы для облицовки стен и потолков, а также встроенной мебели; погонажные архитектурно-строительные изделия; конструкционно-отделочные материалы; вспомогательные материалы (клеи, мастики и т. п.).

Для облицовки стен и потолков изготавливают материалы рулонные, плиты, плитки, листы. К рулонным относят линкруст, влагостойкие обои, пленки декоративные «Изоплен», «Тексоплен» и др. Листовыми и плитными служат декоративный бумажно-слоистый пластик, древесностружечные и древесноволокнистые плиты, листы из жесткого поливинилхлорида и органического стекла, акустические плиты, облицовочные плитки и т. п.

Линкруст — отделочный материал, получаемый путем нанесения тонкого слоя пластмассы, состоящей из полимера, наполнителя, пластификатора и красителя, на плотную бумажную подоснову. В качестве полимера для производства линкруста обычно используют поливинилхлорид, наполнителями служат пробковая или древесная мука; пластификатором — диоктилфталат.

Линкруст неокрашенный или окрашенный по всей массе, гладкий или тисненый с лицевой стороны (рифленый рисунок) выпускают в рулонах длиной не менее 12 м, шириной 0,5; 0,6; 0,75; 0,90 м при толщине по рельефу не более 1,2 мм. Он достаточно водо- и гниlostоек, не коробится при хранении и не выцветает на солнце. Его широко применяют для отделки стен и перегородок в помещениях административных и общественных зданий, кают, вагонов и др. По верхнему краю он окаймляется багетом.

Влагостойкие (моющиеся) обои — отделочный материал с лицевой поверхностью, стойкой к действию воды. Водостойкие обои выпускаются печатные, по одно- и многоцветному фону, с рельефной печатью, тисненные, с клеевым слоем. Ширина всех видов изготавливаемых моющихся обоев 500, 560 и 600 мм при длине рулона 6; 10,5; 12 и 18 м. Для наклеивания обоев используют карбоксиметилцеллюлозные клеи (клейстеры) или метилцеллюлозу водорастворимую.

Поливинилхлоридная декоративная пленка — тонкий, прозрачный или окрашенный по всей толщине рулонный материал. Такие пленки изготавливают вальцово-каландровым способом и выпускают в рулонах двух типов: ПДО — без клеевого слоя и длиной 15 м и шириной 1,5 и 1,6 м и ПДСО — с клеевым слоем длиной 15 и 8 м, шириной 0,45; 0,5 и 0,9 м при толщине 0,15 мм. Пленки с клеевым слоем получают путем нанесения на внутреннюю сторону клея, который прикрывается антиадгезионной бумагой. Перед использованием пленки бумагу, защищающую клеевой слой, снимают и пленку приклеивают к отделяемой поверхности.

Поливинилхлоридные пленки предназначены для отделки хорошо подготовленных поверхностей — стен жилых и общественных зданий, дверных полотен и других элементов интерьера.

Поливинилхлоридные пленки на бумажной подоснове «Изоплен» изготавливают промазным способом из поливинилхлоридной композиции, в состав которой помимо полимера входят наполнители, пластификаторы, красители и различные добавки. В зависимости от вида лицевой поверхности пленки выпускают трех типов: А — одноцветные, Б — многоцветные с печатным рисунком, защищенным прозрачной пленкой, и В — с печатным рисунком, нанесенным на лицевую поверхность поливинилхлоридной пленки. «Изоплен» предназначается для внутренней отделки стен и встроенной мебели жилых помещений. Так как он горючий материал, его нельзя применять на путях эвакуации, в детских помещениях и в помещениях с массовым скоплением людей. Выпускают «Изоплен» в рулонах длиной 10,5; 12,0; 18,0 и 25,0 м, шириной 0,47 м при толщине 0,45 мм. На бумажной подоснове выпускают также вспененные Поливинилхлоридные пленки «Пеноплен». Пленка «Пеноплен» — двухслойный материал, верхний слой которого

состоит из поливинилхлоридной композиции, нанесенной на бумажную подоснову. В состав композиции входят стабилизатор, пластификатор и пенообразователь. Пленка предназначена для внутренней отделки жилых помещений и общественных зданий (кухни, коридоры квартир и гостиниц, прихожие и т. п.), но с учетом ее горючести, как и «Изоплена».

Кроме того, на бумажной подоснове выпускают поливинилхлоридный отделочный материал «Полиплен», который изготавливают путем последовательного нанесения двух-трех печатных слоев из по-ливинилхлоридной композиции. Он предназначен для отделки стен помещений жилых и общественных зданий.

Тканевый отделочный материал «Тексоплен» — окрашенная в полотно или набивная ткань, пропитанная полимерным составом. Кроме того, на изнанку ткани наносят клеевой слой, защищенный антиадгезионной бумагой. Для изготовления «Тексоплена» используют вискозные, смешанные пряжи или хлопчатобумажные ткани разного переплетения. Этот рулонный материал предназначен для внутренней отделки стен, перегородок и встроенной мебели в жилых и общественных зданиях. Рулоны «Тексоплена» имеют длину 6 и 12 м, ширину 0,7—0,9 м при толщине не менее 0,2 мм.

Пластик бумажно-слоистый — декоративный облицовочный материал, получаемый путем прессования нескольких слоев специальных видов бумаги, предварительно пропитанных спиртовыми растворами термореактивных полимеров. Для нижнего и среднего слоев применяют крафт-бумагу, для лицевого слоя — бумагу одноцветную или с отпечатанным рисунком. В качестве связующего применяют мочевино- и меламиноформальдегидные полимеры. Твердая и блестящая поверхность лицевого слоя бумажно-слоистого пластика (бумопласта) может быть однотонной, а чаще всего представляет собой имитацию ценных пород дерева (ореха, дуба и др.) или камня (малахита, мрамора и др.), но она может быть и матовой.

В зависимости от физико-механических свойств и качества лицевой поверхности бумажно-слоистый пластик подразделяют на марки: А — для условий повышенной износостойкости; Б — для обычных условий эксплуатации и В — для применения в качестве подделочного материала.

Пластик выпускают в виде листов длиной от 0,4 до 3 м, шириной 0,4—1,6 м и толщиной от 1,0 до 3,0 мм. Он имеет среднюю плотность 1400 кг/м^3 , предел прочности при изгибе — 100 МПа, твердость по Бринеллю — 25 МПа, водопоглощение за 24 ч — не более 4%. Декоративно-слоистый пластик гигиеничен, достаточно свето- и водостоек, стоек к воздействию бензина, растительных масел, выдерживает нагрев до 130°C . Вследствие высоких декоративных качеств этот материал широко используют для облицовки стеновых панелей помещений общественных зданий, а также для изготовления дверных полотен, бытовой кухонной и медицинской мебели. Его можно сверлить, распиливать, резать, приклеивать к дереву, бетону, штукатурному слою и др. соответствующим клеем (МФ-17, ФР-12, КН-2, фенольной мастикой и др.).

Полистирольные облицовочные плитки изготавливают из полистирола с добавлением в него наполнителя, пигмента способом литья под давлением на специальных литьевых машинах автоматического действия. Наиболее ходовой размер выпускаемых полистирольных плиток 100x100 и 150x150 мм при толщине соответственно 1,25 и 1,35 мм. Масса 1 кв. м — 1,5—1,7 кг.

Цвет плиток может быть самый различный — от пастельных до насыщенных, ярко выраженных тонов. Лицевая сторона — обычно глянцевая, гладкая, тыльная имеет бортик толщиной 6—8 мм и рифленую поверхность. Эти плитки водо- и химически стойкие.

Применение таких плиток запрещается в помещениях с нагревательными приборами открытого огня (кухни и т. д.).

Все большее применение находят в строительстве материалы, получаемые на основе термопластов, — полистирольные панели «Полиформ», поливинилхлоридные панели «Полидекор» и отделочный материал «Винистен».

Панели «Полиформ» размером 500х500 мм при толщине 10 мм с декоративной отделкой, имитирующей текстуру древесных пород, получают на основе полистирола. Истинная плотность не более 1 г/см³, водопоглощение не более 0,65%. Панели крепят гвоздями или шурупами при отделке стен и потолков помещений культурно-бытовых и административных зданий.

Панели «Полидекор» изготавливают из поливинилхлорида методом вакуум-формования и выпускают размерами 1850х995 и 1810х915 мм при толщине 6,0 мм. Используют для отделки стен помещений культурно-бытового назначения (залы, холлы и т. п.).

«Винистен» — отделочный рулонный материал с рельефной поверхностью, изготовленный на основе поливинилхлорида методом экструзии. Длина рулонов 12 м, ширина 1,2 м при толщине до 1,2 мм. Его относительное удлинение при разрыве составляет не менее 120—140%, а разрушающее напряжение не менее 8—9 МПа. Для приклейки используют мастики, например КН-3. Не допускается отделять поверхности со скрытым нагретием.

Погонажные архитектурно-строительные изделия представляют собой длинномерные элементы разнообразных профилей, окраски и назначения, выпускаемые в полной заводской готовности. К числу таких материалов относят плинтусы, поручни для лестничных перил, балконов и других ограждений, защитные и декоративные накладки на проступи лестничных маршей, раскладки для крепления листовых материалов, нащельники и др.

По показателям физико-механических свойств эти материалы могут быть мягкие, полужесткие и жесткие. Их выпускают различных цветов с глянцевой или матовой лицевой поверхностью. Большое значение для отделки зданий крупносерийного строительства имеют профильные погонажные изделия, получаемые методом экструзии на основе суспензионного поливинилхлорида. Наполнителем служит мел или тальк, пластификатором — диоктилфталаты. Используют также в качестве связующего вещества полиэтилен высокого давления.

Плинтусы — элементы оформления помещения, предназначенные для перекрытия стыковых щелей между полом и стенами. На основе поливинилхлорида выпускают два вида плинтусов: мягкие и полужесткие сплошного профиля или с каналами для скрытой слаботочной электропроводки.

Плинтусы на основе поливинилхлорида применяют вместо деревянных, перед которыми имеют ряд преимуществ: не требуют покраски, более гигиеничны, крепятся к полу и стенам специальными клеями или мастиками.

Поручни изготавливают на основе поливинилхлорида методом экструзии и применяют взамен деревянных. Поливинилхлоридные поручни могут быть любого цвета и двух профилей. При выходе из экструдера они сворачиваются в бухты длиной 12 м.

Поливинилхлоридные поручни применяют для оформления лестничных перил жилых и промышленных зданий. Перед натяжением поручня на стальную ленту лестничных перил бухту поручня разматывают и прогревают при температуре 70—80°С. При этой температуре поручень размягчается и легко надевается на полосу перил. После охлаждения до температуры окружающего воздуха поручень прочно закрепляется, плотно обжимая перильную ленту.

Накладки для лестничных ступеней — Поливинилхлоридные изделия, предназначенные для защиты от истирания и других механических повреждений граней бетонных ступеней лестничных маршей. Выпускаются накладки трех видов: полосовые, уголковые и накладки для покрытия углов и проступей.

Окраска накладок может быть различной в зависимости от требований заказчика. Защитные уголки и проступи крепятся с помощью клея № 88 или кумаронокаучуковой мастики. Для крепления проступей часто используют резинобитумную мастику.

К конструкционно-отделочным материалам относятся стеклопластики, древесно-слоистые пластики, древесноволокнистые и древесностружечные плиты.

Стеклопластики — группа полимерных материалов, в которых наполнителем является стекловолокно. В качестве связующих компонентов для производства стеклопластиков применяют ненасыщенные полиэфир, эпоксидные, кремнийорганические и фенолоформальдегидные полимеры. Эти полимеры обладают высокой адгезией к стекловолокну, хорошей смачивающей способностью и достаточно быстро отвердевают без выделения летучих продуктов. Выпускают три разновидности стеклопластиков: листовые материалы с ориентированным стекловолоком, рубленным волокном и на основе стеклоткани или матов.

Большой интерес представляют стеклопластики с ориентированным волокном типа СВМ (стекловолокнистый анизотропный материал). Его получают путем горячего прессования пакета из листов стеклошпона.

Стеклошпон представляет собой тонкие полотнища однонаправленных стеклянных нитей, склеенных спиртовыми растворами карбамидных, бутваро-фенольных или эпоксидных полимеров. Склеивание стеклянных волокон производится в момент вытягивания их через фильеры стекловаренной печи. Полимер, обволакивая стеклянные волокна при выходе из фильер, способствует сохранению их первоначальных высоких механических свойств.

Отличительная особенность СВМ — высокая механическая прочность, зависящая от вида и количества связующего, толщины волокон, их расположения.

Наибольшей прочностью обладает СВМ, изготовленный из волокон диаметром 14—16 мкм, уложенных в одном направлении. При таком расположении волокон предел прочности СВМ при растяжении достигает 950 МПа, а средняя плотность составляет 1800—2000 кг/м³.

Стеклопластики могут быть прозрачными, полупрозрачными и непрозрачными. Прозрачные и полупрозрачные стеклопластики в виде плоских и волнистых листов используют для ограждений лестниц, балконов, устройства прозрачных перегородок, навесов и оформления малых архитектурных форм.

Древесные слоистые пластики — листовый или плиточный материал, получаемый путем горячего прессования лущеного шпона, пропитанного полимерами (фенолоформальдегидный полимер, бакелитовый лак и др.). Шпон в виде листов толщиной 0,3—1,5 мм получают лущением предварительно распаренных кряжей березы, бука, ольхи.

Древесные слоистые пластики (ДСП) в зависимости от порядка укладки шпона выпускают четырех марок: ДСП-А, ДСП-Б, ДСП-В и ДСП-Г. Размеры листов ДСП: длина 0,7—5,6 м, ширина 0,95—1,2 м при толщине 1—12 мм. Плиты ДСП имеют размеры: длина 0,7—5,6 м, ширина 0,7—1,5 м при толщине 35—60 мм.

Древесные слоистые пластики обладают достаточно высокой теплостойкостью, малой теплопроводностью [0,15—0,25 Вт/(м·К)], легко поддаются механической обработке. Их применяют в качестве отделочного и конструкционно-отделочного материала в жилых и общественных зданиях при облицовке стен, перегородок и для подшивки потолков.

Древесностружечные и древесноволокнистые плиты используют не только для покрытия полов, но и как конструкционно-отделочный материал. Первые получают путем горячего прессования массы, содержащей около 93% древесной шерсти (волокон стружки) и 7% синтетических смол. Вторые производят из отходов лесопиления и бумажной макулатуры с полимерной связкой. Такие плиты применяют для устройства и отделки стен, перегородок, встроенной мебели, дверных панелей и подшивки потолков жилых и общественных зданий. Так, например, для облицовки стен используют древесностружечные плиты марок ПН-1 и ПН-2. Длина облицовочных плит от 2,44 до 5,50 м, ширина 1,2—2,4 м и толщина 10—25 мм. Плиты ПН-1 часто отделывают лакокрасочными материалами или полимерными пленками.

Древесноволокнистые плиты с лакокрасочным покрытием применяют для облицовки стен жилых, производственных и общественных зданий, а также для изготовления мебели и дверных полотен. По внешнему виду лицевой поверхности плиты делят на два типа: А —

с печатным рисунком и Б — одноцветные плиты. В зависимости от лакокрасочных материалов плиты могут иметь матовую или глянцевую лицевую, поверхность. Древесноволокнистые твердые плиты с лакокрасочным покрытием выпускают длиной 1,2—2,7 м, шириной 1,0—1,7 м и толщиной 2,5—6,0 мм. Основой для их изготовления служат твердые древесноволокнистые плиты, на поверхностный слой которых наносят лакокрасочные покрытия.

11.5.5. ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Полиизобутиленовая пленка (ПСГ) — рулонный, гидроизоляционный материал, получаемый из полиизобутиленового каучука, газовой сажи и графита. Выпускают также полиизобутиленовую гидроизоляционную пленку УП-50, которую изготавливают из высокомолекулярного полиизобутилена, полиэтилена высокого давления, парафина и наполнителей (сажа, измельченный каменный уголь). Полиизобутиленовые покрытия отличаются высокими гидроизоляционными свойствами, трещиностойкостью и хорошей адгезией к основаниям. Высокая водонепроницаемость, биостойкость и атмосферостойкость этих покрытий позволяют рекомендовать их для оклеечной гидроизоляции. Физико-механические свойства покрытий: средняя плотность — 1300 кг/м^3 , а предел прочности при разрыве — $0,1 \text{ МПа}$. Кроме того, для гидроизоляции применяют полиэтиленовые и поливинилхлоридные пленки.

Гидроизоляционный материал (ГМП) выпускают в виде рулонов; площадь ГМП в рулоне 5 м^2 , толщина полотна $1,5 \text{ мм}$ и ширина $0,8\text{—}1,0 \text{ м}$. Производство ГМП основано на смешении и горячем (150°C) вальцевании компонентов (полиизобутилен, нефтяной битум и асбест 6—7-го сорта) с последующей обработкой на каландрах до получения полотна необходимой толщины. Предел прочности полотна при разрыве $0,12 \text{ МПа}$, растяжимость $30\text{—}50\%$.

ГМП применяют для гидроизоляции подземных сооружений, устройства плоских кровель промышленных и гражданских зданий и гидроизоляционных работ.

Герметизирующие материалы (герметики) применяют для уплотнения швов между панелями и блоками сборных конструкций, заделки-стыков трубопроводов и т. п. В настоящее время для этой цели используют герметизирующие мастики и эластичные прокладки, изготавливаемые на основе полисульфидных каучуков (тиоколов), резинобитумного связующего и других полимеров.

Полисульфидные (тиоколовые) герметики выпускают в виде двухкомпонентных смесей из тиоколовой герметизирующей и вулканизирующей паст. Герметики приготавливают на месте работ путем смешения тиоколовой и вулканизирующей паст с добавлением ускорителя вулканизации и разжижителя. В процессе вулканизации смесь отверждается и образует эластичный, резиноподробный герметик, хорошо уплотняющий шов или стык.

Мастика изол — смесь, состоящая из резиновой крошки, битума, кумаронового полимера, наполнителя (асбестового волокна) и антраценового масла (антисептика). Мasticу применяют для различных герметизирующих работ как в подогретом до температуры $80\text{—}100^\circ\text{C}$, так и в холодном состоянии с добавлением разжижителя (бензин, лигроин и т. п.).

Нетвердеющая мастика — герметизирующий материал на основе полиизобутилена, с мягчителем и наполнителем в виде тонкодисперсного минерального порошка. Эту мастику применяют для уплотнения швов между панелями в крупном домостроении с помощью специального шприца.

Кроме мастик для герметизации швов применяют эластичные прокладки в виде пористых или плотных жгутов (пороизол, гернит и др.).

Клеящие синтетические мастики при оптимальном составе обладают повышенной клеящей (адгезионной) способностью, био- и водостойкостью. При креплении полимерных материалов к тем или иным основаниям наиболее широко применяют мастики КН-2 и КН-3, «Перминид», «Синтелакс» и др.

Клеящие каучуковые мастики КН-2 и КН-3 представляют собой пастообразную однородную массу. Мастики изготавливают из хлоропренового каучука, инденкумаронового полимера, наполнителей и растворителей. Мasticу КН-2 с содержанием каучука $18\text{—}22\%$ по массе используют для приклеивания резинового линолеума, плиток и герметизирующих прокладок; мастику КН-3 с содержанием каучука $11\text{—}14\%$ применяют для приклеивания поливинилхлоридного линолеума, нитролинолеума, профильных

погонажных изделий и паркета. Клеящие каучуковые мастики являются огне- и взрывоопасными и токсичными материалами.

Мастика «Перминид» представляет собой вязкую пастообразную массу темно-желтого цвета. Ее изготавливают из композиции перхлорвинилового полимера, пластификатора, растворителя и различных добавок. Она предназначена для приклеивания рулонных и плиточных поливинилхлоридных материалов к различным основаниям. Мастика «Перминид» — огне- и взрывоопасный материал, как и мастика КН-3.

Мастика «Синтелакс» — вязкая, пастообразная масса белого цвета, изготавливаемая из синтетического латекса, наполнителей и различных добавок. Мастика предназначена для приклеивания рулонных полимерных материалов, поливинилхлоридных и полистирольных плиток, а также полимерных материалов для облицовки стен жилых и общественных зданий.

Резина — эластичный продукт вулканизации каучука с наполнителями, мягчителями и другими компонентами. Вулканизация — процесс превращения каучука в резину, чаще всего осуществляемый с помощью серы при нагревании до 130—160°C (горячая вулканизация). В настоящее время путем введения активаторов (ускорителей вулканизации) можно в течение нескольких минут получать вулканизаты с требуемыми свойствами.

При вулканизации каучука серой его свойства постепенно изменяются. Значительно повышаются эластичность и прочность при растяжении, повышается стойкость к старению, каучук теряет способность растворяться в растворителях, а лишь набухает. Изменение свойств каучука при вулканизации связано с образованием сложной пространственной сетчатой структуры вулканизата. Под влиянием нагрева, действия серы и других структурирующих веществ происходит усложнение молекулярной структуры вулканизата, т. е. появление между молекулами поперечных химических связей («сшивок»).

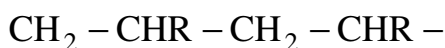
Важнейшими свойствами резины (вулканизата) являются: большое относительное удлинение при разрыве, уменьшение модуля эластичности, полезная упругость при разрыве и др. В соответствии с кинетической теорией упругости каучука и резин при растяжении происходит как бы распрямление и сближение цепей макромолекул. Однако внутреннее тепловое движение молекул противодействует этим изменениям, поэтому после прекращения действия растягивающих сил образец резины возвращается в первоначальное состояние. Определение механических свойств резины представляет значительную трудность, поскольку они зависят от продолжительности действия деформирующей силы, температуры испытания и других факторов. Обычно предел прочности резин при разрыве составляет 5—30 МПа.

В строительстве используют резины для устройства чистых полов, а отходы резины (резиновая крошка) применяют для изготовления резиновых материалов, бризола, битуморезиновых мастик и др.

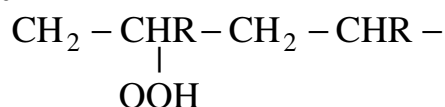
11.6. СТАРЕНИЕ И ДЕСТРУКЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Эксплуатационные условия, в которых могут находиться пластмассы, полимерные изделия и конструкции, защитные покрытия, не всегда бывают благоприятными для устойчивого состояния материала. Трубопроводы в грунте, полы в цехах химических предприятий, антикоррозионные покрытия в морских гидротехнических сооружениях, пленочное экранирование водохранилищ, тентовые конструкции, облицовки кислотных емкостей из железобетона и т. п. — лишь отдельные примеры таких условий работы конструкций и изделий. В сложных эксплуатационных условиях изделия и конструкции из полимерных материалов или изготовленных на их основе (пластмассы, полимеррастворы и полимербетоны) вступают в контакт с газообразными и жидкими агрессивными средами, подвергаются не только механическим напряжениям, но и воздействию тепловой энергии, ветра, солнечной радиации, кислорода и озона, влажного воздуха, паров растворителей или других жидкостей. Ускоренное протекание процессов деструкции и старения полимеров обусловлено совмещением действия активных внешних факторов с механическими напряжениями в материале, особенно на растяжение.

Под воздействием различных активных факторов и при высокой для данного материала температуре могут развиваться в полимере процессы окисления и деструкции с разрывом макромолекул по длине цепи, отрывом отдельных или групп атомов от ее звеньев. Так, например, под влиянием озона возникают функциональные группы — гидроксилы, карбоксилы. Они являются своеобразными предвестниками начинающейся химической деструкции:



Под влиянием озона возникает



В реакциях деструкции полимеров характерным является снижение молекулярной массы и выделение летучих продуктов — хлористого водорода, оксида и диоксида углерода и др. К наиболее слабым частям молекул, способным реагировать с воздействующей средой, относятся двойные связи и активные в химическом отношении радикалы.

Изменение структуры большинства полимерных материалов связано с влиянием светового облучения, например активной части солнечной радиации (длина волн $30\text{--}36 \cdot 10^{-8}$ м), действием ультрафиолетовых лучей, особенно при свободном доступе воздуха, повышенных температурах и длительном механическом напряжении под воздействием разрывных усилий. Характер соответствующих изменений в материале может выражаться в деструкции (расщеплении макромолекул), возможно с побочными явлениями — выделением газов, паров пластификатора, увеличением (или уменьшением) двойных связей, что усиливает реакционную способность и обуславливает неустойчивую структуру. Характер изменений в материале может выражаться также в дополнительном структурировании, например химическом «сшивании» под воздействием ионизирующих излучений. Операции деструкции и химического «сшивания» нередко протекают одновременно, хотя может превалировать одна из них. Установлено, что если полимерные материалы подвергались действию радиации, то практически нельзя устранить изменения их механических свойств, поскольку возникают и развиваются химические необратимые реакции. Если в полимере имелся пластификатор, то под влиянием его частичного испарения нарастает жесткость изделий во времени и понижается их морозостойкость.

Недостатком материалов на основе полимеров нередко является способность этих связующих поглощать воду при длительном контакте, набухать со снижением прочности, упругости и ухудшением других качественных характеристик. Отдельные полимеры при действии воды, особенно слабощелочной или слабокислой, подвержены гидролизу с последующим вымыванием продуктов гидролиза, что повышает пористость. Большинство

полимеров (и полимербетонов) имеет пониженную водостойкость, повышенную усадку; не всегда полезен их высокий коэффициент температурного расширения.

Деструктивные явления и процессы старения рассмотрены ниже в отношении ряда термопластичных и термореактивных полимеров.

Полиэтилен высокого и низкого давления, широко употребляемый в строительстве, характеризуется в целом высокой стойкостью при температурах до 60°C, но он не стоек к действию окислителей при повышенных температурах. Вода не вступает с этим аполярным полимером в химические взаимоотношения и не пластифицирует его, но в среде ПАВ (например, эмульгатора ОП-10) наблюдается значительное увеличение поглощения водной среды. Полиэтилен подвержен старению и окислительному разрушению под действием активной части солнечной радиации, ионизирующего излучения. После облучения этот полимер полностью теряет способность растворяться в органических растворителях, приобретает упругость, причем модуль упругости может увеличиться на 200—250% с нарастанием и его хрупкости. Эти изменения свойств могут отражать образование поперечных связей («сшивок»), хотя в кристаллизованном полиэтилене между цепями молекул всегда действуют слабые ван-дер-ваальсовы силы.

Полиизобутилен стоек к действию минеральных кислот, концентрированных едких щелочей. Однако под влиянием ароматических и хлорированных углеводородов он сравнительно легко растворяется с потерей исходных физико-механических свойств.

Поливинилхлорид и его сополимеры с винилацетатом характеризуются высокой стойкостью к кислым и щелочным средам. Трубы из поливинилхлорида успешно используют для транспортирования агрессивных жидкостей при температуре от -15 до +60°C. Но и этот полимер, а также полистирол с его высокой способностью сохранять твердость при повышении температуры (температура плавления его 230°C) не проявляют стойкости при солнечном облучении и быстро стареют, набирают хрупкость.

Полиэфирные полимеры имеют высокую стойкость к большинству кислот любой концентрации до температуры 80°C, к сульфатам, хлоридам, спиртам, нефтепродуктам. Но они подвержены коррозионному воздействию азотной, уксусной и муравьиной кислот. Они не проявляют достаточной стойкости к едким щелочам, к некоторым средним и особенно кислым солям, например к углекислому калию, сернокислому натрию.

Эпоксидные и фурановые полимеры не отличаются высокой химической стойкостью к воздействию сильных окислителей. Производные от них, например эпоксидно-фурановые материалы, имеют слабую химическую сопротивляемость к уксусной и молочной кислотам.

Остаются весьма сложными условиями для большинства полимеров: работа при температуре ниже их температуры хрупкости, когда разрушение материала может наступить мгновенно (см. 5.2). Стабилизации структуры, повышения стойкости полимеров к деструкции и старению достигают различными технологическими и эксплуатационными мероприятиями общего и специфического характера. Сравнительно общим способом торможения деструкции при воздействии света и облучений является введение химических реагентов (соединений), способных поглощать ультрафиолетовые и другие лучи, не подвергаясь сами фотосинтезу или изменениям. К таким реагентам относятся, например, для стабилизации полиэтилена и др. — бензотриазол, тинувин, хлористый марганец и т. п. Другой способ — введение светоотражающих добавок, например алюминиевой пудры. В полимеры вводят также антиоксиданты, наполнители, стабилизаторы и др. В эксплуатационный период приносят пользу меры нанесения мастик, эмалей, паст на лиофобной основе для изоляции.

Строительные конгломераты с применением комплексных вяжущих веществ

В широкую группу безобжиговых конгломератов входят материалы на основе комплексных вяжущих веществ — смешанных, компаундированных и комбинированных. Ниже рассмотрены основные разновидности этих искусственных безобжиговых строительных материалов с конгломератным типом структуры, технологические особенности и качественные показатели каждого из них.

12.1. КОНГЛОМЕРАТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СМЕШАННЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Для получения на основе смешанных вяжущих веществ (см. 9.1.5) конгломератных материалов требуются дополнительные компоненты, которые в отмеренных количествах способны образовать смесь, а после отвердевания — и монолит, в котором заполняющая часть сцементирована непрерывной пространственной сеткой цементного камня при минимальной толщине его пленочного распределения. Такой выбор структурных параметров обеспечивает сформировавшемуся конгломерату оптимальную структуру с комплексом экстремальных показателей свойств. Эта закономерная взаимосвязь оптимальной структуры с наиболее благоприятными показателями (экстремальными) качества отражает, как известно, закон створа.

Кроме смешанного вяжущего вещества в качестве компонентов выступают, во-первых, жидкая среда и, по аналогии с большинством других неорганических вяжущих веществ, обычно к ней относится вода; во-вторых, крупно- и мелкозернистые фракции искусственного или природного заполнителей. В состав могут быть введены и некоторые специальные добавки, повышающие качественные показатели смеси или готового продукта. Выбор заполнителей и других компонентов обусловлен разновидностью ИСК и конструкции в целом, технологическими параметрами и режимами, принятыми или принимаемыми для заводской практики. Проектирование оптимального состава при рациональной структуре конгломерата осуществляется общим методом, принятым в теории ИСК, или иным научно обоснованным методом.

Наиболее распространенной продукцией, изготавливаемой на основе смешанных вяжущих веществ, по-прежнему остаются бетоны. Для этих конгломератов используются те же компоненты, что и для цементных бетонов. Поэтому следует остановиться на специфике взаимодействия соответствующих смешанных вяжущих веществ с водой. Особый интерес представляют гипсоцементно-пуццолановые вяжущие вещества (ГЦПВ), поскольку, как отмечалось выше, в них содержится до 75% (по массе) строительного полуводного гипса, а смешанное вяжущее, тем не менее, становится гидравлическим. В состоянии теста оно способно отвердевать во влажной и даже в водной среде, причем быстро схватывается и набирает начальную прочность в ранние сроки подобно гипсу. Однако в отличие от гипса имеет повышенную прочность, улучшенные деформативные характеристики, увеличенную водо- и морозостойкость. В сравнении с портландцементом ГЦПВ более сульфатостойкое и менее чувствительное к воздействию некоторых органических кислот, особенно ГЦП-камень на основе α -полугидрата — приобретает большую плотность, прочность и улучшенные показатели водо-, морозо- и атмосферостойкости.

При формировании ГЦП-камня и конгломератов существенную роль играет разновидность портландцемента как компонента ГЦПВ, его химико-минералогический состав. При взаимодействии с водой портландцемент выделяет, как известно, свободный гидрат оксида кальция. Он вступает в химический контакт с кислой активной минеральной добавкой типа природного пуццоланизирующего вещества. Образуются гидросиликаты кальция, а с алюминатной частью вяжущего — гидросульфоалюминаты

кальция. Поэтому для ГЦПВ из цементных вяжущих предпочтительнее использовать некоторые пуццолановые и шлаковые портландцементы, а также низко-алюминатные цементы. Из активных минеральных добавок предпочтение отдают веществам осадочного происхождения, например высокоактивным трепелам и некоторым видам опок, а также кислым шлакам, керамзитовой пыли.

Активные минеральные добавки снижают концентрацию гидро-оксида кальция в водном растворе до пределов, при которых гидро-сульфоалюминат кальция возникает преимущественно в водной среде, а не на поверхности цементных частиц, что способствует упрочнению структуры цементного камня. Они, во-первых, химически связывают сульфаты, алюминаты и ферриты кальция в комплексные соединения, менее растворимые в воде по сравнению с исходными веществами, что способствует гидравлическому твердению гипсоцементных композиций и повышению прочности и водостойкости ГЦП-камня и бетона.

Если в качестве минеральных добавок приняты гидравлические доменные шлаки, то целесообразно изготавливать и применять в бетонах гипсошлакоцементное вяжущее вещество (ГШЦВ) с содержанием примерно 65—40% полуводного гипса или ангидрита, 30—50% кислого доменного шлака и 5—8% портландцемента. Последний играет в этой смеси роль щелочного активизатора шлаков. При повышенной активности доменных шлаков рекомендуется также добавлять 10—15% пуццолановых добавок для снижения концентрации гидрооксида кальция до безопасных пределов с получением ГШЦПВ.

Формирование ГШЦ-камня и ГШЦП-камня начинается и протекает сразу же после затворения вяжущего вещества водой. Происходит гидратация полуводного гипса с образованием кристаллов двуводного гипса. Одновременно протекают реакции взаимодействия портландцементного клинкера с водой. Возникающие новообразования вступают в контакт с гипсом, образуя кристаллы этtringита. Игольчатые кристаллы этtringита как бы армируют структуру камня, способствуют дополнительному уплотнению и упрочнению формирующегося каркаса из двуводного гипса в виде кристаллического сростка. Следует, однако, отметить, что щелочность среды в этот период понижена за счет взаимодействий свободного гидрооксида кальция с активным минеральным веществом в виде пуццолановых (в ГЦПВ) или шлаковых (в ГШЦПВ) добавок. Поэтому снижается устойчивость кристаллической фазы высокоосновного гидроалюмината кальция, частично разлагается этtringит с переходом в более стабильную фазу $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSCU}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$, возникает гелеобразная (субмикрорекристаллическая) масса продуктов гидратации силиката кальция, содержащих низкоосновные силикаты кальция типа CSH(B). Субмикроскопическая масса образует пространственную сетку экранирующих пленок вокруг кристаллов двуводного гипса и кристаллических новообразований, исходных частиц портландцемента и других дисперсных компонентов, цементируя их в общий микродисперсный конгломерат ГЦП-камень или ГШЦП-камень.

В композициях, содержащих портландцемент, активные минеральные добавки, сульфат кальция и воду, наряду с гидросульфоалю-минатом кальция и низкоосновными силикатами могут образоваться также гидрогранаты состава $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot(6-2x)\text{H}_2\text{O}$, как это было установлено Н.А. Тороповым и др.; гидросиликоалюминаты кальция состава $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSiO}_3\cdot(12-13)\text{H}_2\text{O}$ или $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSiO}_3\cdot 31\text{H}_2\text{O}$, как это было отмечено в исследованиях Ляфюма, Флинта, Уэльса и др.; гидроалюмосиликат кальция (гидрогеленит) состава $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$. Подобного рода соединения при их возникновении в гипсоцементных системах могут обуславливать упрочнение структуры затвердевшего камня, повышение расчетной активности и, следовательно, прочности бетонов на его основе.

ГЦПВ обладает коротким сроком схватывания (4—7 мин), что связано с необходимостью введения замедлителей процессов структурообразования. Выбор вида и количества ингибитора оказывает влияние на свойства камня. Сильнодействующими замедлителями

схватывания являются коллоидные растворы органических веществ (казеина, кератина и др.), которые, адсорбируясь на кристаллах гипса, препятствуют их контакту с водой. Добавление, например, клее-известкового или каратинового замедлителя в малых количествах (0,2—0,4%) отдалает начало схватывания гипсового теста на 30—35% без снижения прочности камня. Замедлители оказывают также пластифицирующее действие, что позволяет снижать водопотребность ГЦП—вяжущего вещества. Эти малые добавки, адсорбируясь на гранях растущих кристаллов, способствуют формированию мелкокристаллической структуры, что также обуславливает увеличение прочности камня, хотя при введении их сверх оптимума вызывает образование прослоек, препятствующих срастанию кристаллов, и понижение прочности.

В целях повышения адгезионной способности и долговечности иногда в ГЦПВ добавляют в количестве 5—15% (по массе) поливинилацетат в форме водной дисперсии или дивинилстирол — латекс СКС-65 ГП и другие полимеры.

Бетоны на основе ГЦПВ изготавливают тяжелые (обычные), мелкозернистые, легкие, поризованные и др. Для тех же целей на основе гипса предложены и другие разновидности смешанных вяжущих веществ, которые также имеют повышенные показатели водостойкости, прочности, морозостойкости по сравнению с чистым гипсом, например комплексное вяжущее из гипса, негашеной извести и тонкомолотого песка или комплексное вяжущее из гипса и нефелинового шлама и др.

Ниже приводится пример производства поризованного керамзитобетона на основе ГЦПВ¹ с получением из него крупных стеновых блоков для жилого дома. Все исходные материалы были в основном местные (Узбекистан) — строительный гипс марки Г-5; портландцемент марки 400 (с добавлением при помоле клинкера необожженного гипса в количестве 3%); кислая гидравлическая добавка-опока с активностью по поглощению оксида кальция 264 мг/л; замедлитель сроков схватывания — клееизвестковый и кератиновый; поризующее вещество — смолосапониновый пенообразователь. Установлен оптимальный состав ГЦПВ: 67% гипса, 22% портландцемента и 11% опоки (по массе). Количество замедлителя: клееизвесткового — 0,2%, каратинового — 0,4% от массы вяжущего вещества. Свойства полученного ГЦП-вяжущего вещества: активность 12,5—18,0 МПа, начало схватывания 4 мин, конец схватывания — 7 мин. После добавления замедлителя срок схватывания удлиняется до 25—35 мин. Повышенная прочность ГЦПВ позволила поризовать камень. Заполнитель — керамзитовый марки 500. Из его фракций была подобрана плотная смесь с частицами размером от 2,5 до 15 мм. Прочность керамзитовой смеси составила 8,2 МПа по испытанию в цилиндре, средняя плотность 515 кг/м³, морозостойкость — до 20 циклов при потере по массе 6,8%, что удовлетворяет требованиям стандарта. Общим методом ИСК были запроектированы оптимальные составы бетона марок М-35 и М-75 (табл. 12.1) на основе ГЦПВ. Принятая последовательность технологических операций на заводе: дозирование сухих компонентов и перемешивание их в мешалке в течение 30 с; добавление воды, в количество которой входила и та ее часть, которая поглощалась керамзитовой смесью (15% массы сухого керамзита); добавление замедлителя и пенообразователя; дополнительное перемешивание смеси в течение 30 с; раскладка смеси по формам, виброуплотнение в течение 2 мин при частотности 3000 кол/мин, амплитуде 0,5 мм и с пригрузом массой 50 г/см². Режим твердения — естественный, воздушный, распалубка — через 1 ч с момента заполнения формы смесью. Исследования получаемого керамзитопенобетона подтвердили возможность использования его в качестве стенового материала с маркой на морозостойкость 25 (для резкоконтинентального климата) и с усадочными деформациями 0,40—0,65 мм/м у непропаренного бетона марки М-75.

¹ По материалам научно-производственной работы к.т.н. С.Х. Исламкуловой выполнявшейся под научным руководством И.А. Рыбьева.

Таблица 12.1. Оптимальные составы бетона марок М-35 и М-75

Состав смеси	Марки бетона	
	М-35	М-75
ГЦПВ, %	55	60
Керамзит, %	45	40
Водо-вяжущее отношение $B/B_{\text{нп}}$	0,3	0,3
Поризатор ССП (в % от сух.см.)	0,5	0,3

Шлакощелочные бетоны и конструкции изготовляют на основе щелочных (натриево-калиевых) и щелочно-щелочноземельных (натриево-калиево-кальциевых) гидравлических вяжущих веществ¹. В первых — соединения кальция отсутствуют, во вторые — вводятся в составе низкоосновных кальциевых соединений, а высокоосновные кальциевые минералы типа C_3S , C_3A , C_4AF или вовсе отсутствуют, или их вводят в составе портландцемента. Прочность шлакощелочных вяжущих веществ (по раствору состава 1:3) находится в пределах 40—120 МПа, а у высокопрочных достигает 150 МПа, при нормальной густоте цементного теста — до 180 МПа. Максимальная прочность портландцемента (по раствору 1:3) составляет, как известно, до 60 МПа. Конгломераты типа бетонов на основе шлакощелочного цемента пока еще мало изучены, но им, по-видимому, в будущем предстоит занять достойное место среди неорганических и органических (типа арболитов) ИСК.

Марки тяжелых шлакощелочных бетонов с применением крупных заполнителей изменяются от 20 до 140 МПа, при мелкозернистых (грунтосиликатных) заполнителях — от 20 до 160 МПа, марки легких бетонов — 8—70, ячеистых 5—10 МПа. Предел прочности при растяжении составляет $1/10—1/15 R_{сж}$, на изгиб — $1/7—1/10 R_{сж}$. Бетоны обладают высокой морозостойкостью (до 700 циклов) и водонепроницаемостью (до 2 МПа), так как в структуре — замкнутые поры. Конструкции из шлакощелочного бетона имеют длительный период упрочнения в гидротехнических сооружениях и животноводческих фермах, отличаются водонепроницаемостью, морозостойкостью, коррозиестойкостью. Исследования В.Д. Глуховского и его научной школы показали, что продуктами структурообразования в этих бетонах являются аналоги природных щелочных цеолитов (водных алюмосиликатов натрия, реже — калия) и анальдима, которые, как оказалось, весьма характерны и для новообразований в продуктах гидратации древних бетонов в пирамидах Египта (Хеопса и Хефрена).

Производство шлакощелочных бетонов практически адекватно производству обычных цементных бетонов. Повышенного внимания заслуживают шлакощелочные мелкозернистые бетоны, особенно с применением тонкодисперсных заполнителей с возможным присутствием в них глинистых частиц. Последние в природном и обожженном состояниях, а также смеси аморфного кремнезема и глинозема взаимодействуют с едкими щелочами и щелочными силикатами с образованием водостойких гидроалюмосиликатов, проявляющих вяжущие свойства. Поэтому в шлакощелочных цементах и заполнителях допускается наличие обоснованного количества глинистых частиц с пользой для качества бетонов, а также с расширением возможности применения «некондиционных» заполнителей и среди них — гранитного отсева дробленого песчаника, известняка, горелых пород шахтных терриконов, отвального шлака, стекловидных алюмосиликатов в виде шлаков и др. Однако следует учитывать, что характер и ширина контактной зоны шлакоцементного камня и заполнителей зависят от состояния поверхности заполнителя. Так, микротвердость (в МПа) на границе с гранитом выше, чем с песчаником, далее по нисходящей следуют железистые алевролиты и аргиллиты, отвальный шлак, известняк, керамзит и т. д.

¹ См. подробнее в 9.1.2, а также «Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции» / Материалы 3-й Всесоюзной научно-практической конференции (в двух томах). Киев, 1989.

Наибольшая ширина контактной зоны (60—80 мкм) имеется при применении граншлака и аглопорита, наименьшая (10—15 мкм) — при использовании известняка. Но во всех случаях, вследствие специфических свойств шлакощелочных цементов и структурообразования в присутствии щелочи, эта зона составляет прочную оболочку низкоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов вокруг зерен заполнителя, повышает сопротивляемость бетона внешним механическим и химическим воздействиям, а также поддерживает однородность напряжений и деформаций в структурных элементах конгломерата, предохраняет недостаточно стойкие заполнители от влагообменных процессов. В связи с этим улучшаются физико-механические свойства и долговечность шлакощелочных цементного камня и бетона.

Повышению прочности бетона благоприятствует: применение более крупного заполнителя (фракции 5—10 мм) при меньшем расходе шлака и щелочного компонента, т. е. цементного камня, как непрерывной пространственной сетки матричного вещества; минимальной пустотности смеси заполнителей в уплотненном состоянии; оптимальной плотности раствора щелочного компонента (например, метасиликата натрия, кальцинированной соды и др.). Увеличению сроков схватывания шлакощелочного цемента, а следовательно, продолжительности выдержки бетонной смеси на его основе до формирования способствует совместный помол шлака с кремнийорганическими и другими ПАВ.

Скорость нарастания прочности шлакощелочных бетонов после их формирования зависит от плотности раствора и вида щелочного компонента. Так, например, мелкозернистые бетоны с применением раствора метасиликата натрия плотностью 1300 кг/м^3 относятся к быстротвердеющим, если использовать менее плотные растворы, скорость роста прочности значительно замедляется. Она становится совсем малой у бетонов, в которых шлакощелочное вяжущее вещество формируется на основе кислого молотого шлака и раствора соды Na_2CO_3 , что отражает важную роль состава вяжущего вещества. Но на скорость роста прочности и, следовательно, структурообразования влияют также и заполнители. Так, например, при применении заполнителей из гранита и песчаника продолжительность периода, в который наблюдается незначительный прирост прочности бетона, весьма мала (менее 3 ч), тогда как скорость нарастания прочности бетона наибольшая. При использовании заполнителей из глинистых сланцев и аргиллитов наблюдается существенное (12 ч и более) увеличение продолжительности периода незначительного прироста прочности, тогда как темп нарастания прочности ниже, чем у бетонов с заполнителем из глинистых сланцев. В этих явлениях вновь проявляется роль поверхности заполнителя и новообразований контактной зоны. Естественно, что свое влияние на эти процессы оказывают тепловые режимы, принимаемые при обработке твердеющих бетонов. Однако следует отметить, что мелкозернистые шлакощелочные бетоны твердеют в воде, при пропаривании и в естественных условиях (воздушно-сухих и влажных). При автоклавной обработке достигается более высокий эффект повышения их прочности.

Эта разновидность бетонов обладает комплексом и других полезных свойств: малым тепловыделением при твердении, высокой биостойкостью, абразивной устойчивостью и износостойкостью, повышенной жаростойкостью и др. В исследованиях контактной зоны отмечается максимум микротвердости, повышенное содержание водонерастворимых новообразований, а структура контактного слоя приближена к оптимальной.

Шлакощелочные бетоны имеют реальную перспективу широкого применения в строительстве вследствие не только своего высокого качества и пониженной стоимости, но и благодаря обширной сырьевой базе шлаков и щелочного компонента. Шлаки гранулированные могут быть доменными, электротермофосфорными и других металлургических производств. Для получения щелочного компонента — соединений щелочных металлов — могут использоваться технические продукты: сода кальцинированная синтетическая, поташ, фтористый натрий; растворимые щелочные

силикаты (жидкие стекла с силикатным модулем от 1 до 2,5); природная сода; побочные продукты производства; капррлактам с получением побочного продукта в виде поплава соды кальцинированной; клинкерообжигательных печей с выдачей пыли электрофильтров, в которой обычно содержится свыше 10% карбонатов натрия и калия; содового с выдачей побочного продукта в виде плавленной смеси щелочей ($\text{NaOH} + \text{KOH}$); двуокиси титана и глинозема с выдачей побочного продукта метасиликата натрия и др. Расчеты технико-экономической эффективности шлакощелочных цементов и конгломератов на их основе, проводившиеся различными учеными и специалистами-практиками, показали безусловную перспективность интенсивного применения их в строительстве, в первую очередь сельскохозяйственном, дорожном, гидромелиоративном и др. Вместе с тем при решении проблемы массового применения этой разновидности минеральных вяжущих веществ смешанного типа предстоит дальнейшее совершенствование их свойств, в частности, полное предотвращение высолообразований на поверхности бетонов, улучшение деформативных характеристик бетона и др.

12.2. МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ КОМПАУНДИРОВАННЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Компаундированные вяжущие вещества (компаунды), получаемые сплавлением или смешением органических вяжущих веществ различных видов и марок, используют в основном для производства кровельных, гидроизоляционных и герметизирующих материалов и изделий. Но они могут применяться также и для бетонов типа асфальтовых или полимерных, полимерцементных.

Герметик получают на основе двух синтетических каучуков — этиленпропилен-каучука (СКЭП) и бутилкаучука БК с молекулярной массой выше 20 000. Оба синтетических каучука смешивались на вальцах при температуре 60—80°C в течение 10 мин до однородного состояния; затем в массу в качестве мягчителя добавляли минеральное масло ИС-30 и наполнитель — сепарированный мел. Затем масса подвергалась окончательному перемешиванию в течение 30 мин при той же температуре. Каждый компонент, вошедший в состав герметика, выполняет наиболее характерные для него функции: этиленпропиленовый каучук формирует подвижную пространственную сетку мастики; бутилкаучук увеличивает клейкость этого каучука; мягчитель снижает вязкость системы, что особенно важно при внесении герметика в шов; наполнитель упрочняет систему, способствует быстрому нарастанию теплостойкости мастики. Эти компоненты имеют и другие функции, но указанные в основном обуславливают качество нетвердеющего герметика.

Существенно улучшает качество *асфальтовых бетонов* использование компаундированного битума с добавлением в него резино-каучуковых веществ. У асфальтобетонов повышаются упруго-эластические и теплостойкие свойства, морозе- и температуростойкость. За рубежом и в нашей стране накопился достаточный опыт добавления каучука и резины в битумы. Наиболее эффективное воздействие на битумы оказывает натуральный каучук и синтетический *gR-S* марки П. По данным автора, резина (протекторная крошка) резко повышает эластичность битумов, например уфимского: при введении в него резины в количестве 20% кратковременная эластичность возросла почти в 3 раза, а у дрогобычского — в 6 раз по сравнению с исходным битумом. Соответственно у асфальтового вяжущего вещества — на 75% и в 4—5 раз, а с люберецким битумом — в 15—20 раз. По абсолютной величине кратковременная эластичность оставалась наиболее высокой у асфальтовяжущего вещества с уфимским битумом. Рациональное количество резинового порошка, добавляемого в битум и асфальтобетон при заданной температуре, устанавливается экспериментальным путем по оптимальной величине Б/П.

Другим возможным способом обогащения битума каучуковым веществом является впрыскивание каучукового латекса в битум в процессе его горячего потока (200—210°C), чтобы обеспечивалось сравнительно мгновенное и полное испарение воды из латекса, но исключалась возможность деполимеризации каучука. Получаемый новый компаундированный материал, именуемый как гуммированный битум, обладает повышенной эластичностью, увеличивающейся при одновременном добавлении в него серы или серосодержащих органических соединений. За рубежом используется накопленный опыт по компаундированию битума полимерами — эпоксидной смолой, полиэфирной смолой. Получаемый ИСК именуется нередко как «эпон-асфальт». Он отличается высокой прочностью при растяжении и сжатии, высокой сопротивляемостью органическим (нефтяным) растворителям и щелочам, а в эксплуатационный период — высокой теплостойкостью и долговечностью.

Компаундированными вяжущими с применением в них кумаро-новой смолы, глифталевых и идиоловых полимеров, а в зарубежной практике — светлых синтетических битумов, а также полимеров, пользуются при изготовлении цветных асфальтовых бетонов для устройства парковых дорожек, оформления городских площадей и скверов, пешеходных переходов и других объектов.

Материалы на основе комбинированных вяжущих веществ. Комбинированные вяжущие вещества позволяют изготавливать высококачественные материалы с конгломератным типом структуры. Среди них более часто встречаются комбинации на основе неорганических и органических соединений. В первую очередь это относится к полимерцементным бетонам, бетонополимерам и цементно-полимерным бетонам.

Полимерцементные бетоны получают на основе традиционных минеральных вяжущих веществ — портландцемента, глиноземистого цемента, извести, гипса, жидкого стекла и др. С принятым неорганическим веществом объединяется мономер или полимер (пропиловый спирт, пропилен, пропил амин и др.), находящийся в виде водного раствора. После отверждения образуется своеобразный по-лимерцементный (или иного названия) камень, как матричная часть ИСК. Количество вводимого мономера (или полимера) составляет 4—10% или более по массе в пересчете на сухое вещество. В результате прочность бетона (или другого материала) заметно увеличивается при испытаниях на растяжение, изгиб и ударную нагрузку, повышается химическая стойкость ИСК и адгезионная способность вяжущего компонента. Возрастает морозостойкость и водонепроницаемость. Вместе с тем, снижается скорость микроструктурообразования, возможен рост усадочных явлений. Так, например, отмечено, что гидролиз и гидратация алита и C_3A в водных растворах мономеров или полимеров замедляется. Наблюдается тенденция к увеличению основности гидроалюмината кальция при росте концентрации C_3AH_6 . Также используются водорастворимые полимеры — эпоксидные смолы С-89, карбамидные смолы, поливиниловый спирт, метилцеллюлоза и др.

Для получения полимерцементного бетона возможно вместо водного раствора полимера (мономера) вводить водную дисперсию полимера, например поливинилацетатной дисперсии, бутадиен-стирольного латекса или латексные дисперсии. Можно также использовать нерастворимые в воде полимеры, например эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые и другие олигомеры, способные с помощью соответствующих эмульгаторов образовывать достаточно устойчивую эмульсию при интенсивном перемешивании с минеральным вяжущим веществом.

Бетонополимеры получают путем обычной технологии цементного бетона, однако на завершающей стадии твердения бетонного изделия производится его вакуумная сушка и последующая пропитка мономером. Среди употребляемых мономеров — метилметакрилат, стирол, низкомолекулярные эпоксидные смолы, ФАМ и др. Они заполимеризовываются в порах цементного камня и бетона под влиянием кислорода воздуха, повышенных температур, отвердителей и др. Пропитка полная или только верхнего слоя на глубину 10—20 мм изделия снижает сквозную пористость, повышает прочность исходного цементного бетона. Его предельная прочность при сжатии может составить до 120—300 МПа: Возрастает в 3—4 раза сопротивление истиранию. Резко снижается ползучесть с возрастанием модуля упругости. Повышается морозостойкость, увеличиваясь с 200 до 500 циклов, водонепроницаемость, химическая стойкость. Но введение мономера удорожает бетон, поэтому его используют в ответственных конструкциях, при производстве туннелей и др.

Порошкообразный водонерастворимый полимер или мономер может быть внесен в бетон как обычный наполнитель на стадии производства бетонной смеси. Для придания дисперсной системе повышенной гидрофильности в нее вводят ПАВ.

Из неорганических веществ для пропитки бетона применяют жидкое стекло и серу. Состав серных бетонов: сера 58—70%, минеральный наполнитель 30—40%, пластификатор 1—4%. При температуре 180—200°C и последующем быстром охлаждении образуется полимерная сера: в макромолекуле находятся многие десятки тысяч атомов серы.

Цементно-полимерный бетон получают так же, как и полимерцементные. Однако количество вводимых полимеров ограничивается 1—3% по массе или даже меньше (в

пересчете на сухое вещество). Присутствие полимера в бетоне даже в таких малых количествах приносит техническую пользу.

Фибробетон — разновидность цементного бетона, в котором достаточно равномерно распределены обрезки — «фибры». Под этим собирательным названием подразумеваются волокна из металла, отрезки тонкой стальной проволоки, отходы гвоздевого производства и др., а также из щелочестойкого стекловолокна, полимеров (главным образом полипропилена) и т. п. Фибра в бетоне выполняет функции армирующего компонента, что способствует улучшению качества бетона (фибробетона), повышает его трещиностойкость и деформативность. Вследствие того, что фибра вносится в процессе перемешивания, распределение волокон становится неорганизованным, хотя вибрационное воздействие на бетонную смесь при уплотнении благоприятствует направленному размещению отдельных волокон. При параллельной ориентации их к действию растягивающих усилий на изделие из фибробетона прочность последнего значительно (в 2—3 раза) возрастает по сравнению с хаотическим (объемно-произвольным) армированием, когда меньшая часть волокон участвует в восприятии усилий от нагрузок. К фибре предъявляются определенные технические требования, например в отношении ее химической стойкости к щелочной среде бетона длины волоконца по сравнению с их диаметром (не менее 10:1). По зарубежным данным, оптимальным является отношение $l/d = 100 - 150$. Требования также касаются показателя прочности на растяжение, модуля упругости, адгезии к бетону, коэффициента линейного расширения и др. Концентрация фибры в объеме бетона устанавливается на стадии проектирования оптимального состава и зависит, в частности, от ее комкуемости при перемешивании бетонной смеси. Рациональное содержание армирующих волокон в бетоне уменьшается по мере увеличения количества крупного заполнителя, особенно после 30—35% его по массе. Предельное насыщение матрицы стальными волокнами при обычном способе перемешивания составляет 2—3%, стеклянной — 3—5%.

При упрочнении матрицы оптимальной структуры фиброй упрочняется и ИСК, что соответствует закону конгруэнции.

Исследования показывают, что при использовании нейлона, полиэтилена, полипропилена и других армирующих волокон с низким модулем упругости увеличивается их относительная растяжимость, а у фибробетонов и других ИСК повышаются ударная вязкость, сопротивляемость истиранию и выкалыванию линз, каверн и т. п. Применение волокон из стали, щелочестойкого стекла, асбеста и других волокон с высоким модулем упругости (по сравнению с матрицей) увеличивает прочность бетона (ИСК) при растяжении и даже сопротивляемость динамическим воздействиям. Более целесообразно — комбинирование армирующих волокон.

Эффективным является введение фибры, подвергшейся поверхностной обработке полимерными веществами или их компаундами. Максимальные прочностные показатели (например, при сжатии до 40 МПа и более) достигаются при 3%-ном содержании фибры (по объему) и длине фибры 40—45 мм.

В технологии фибробетона наиболее трудной операцией является перемешивание бетонной смеси с фиброй. В основном пока используют обычные типы мешалок — барабанные, растворные с принудительным лопастным перемешиванием. Однако дальнейший успех эффективного фибробетона связан с совершенствованием технологии и разработкой специальной техники, способной обеспечить высокое качество перемешивания разнородных компонентов при любых необходимых количествах волокон в бетонной (растворной) смеси.

Фибробетоны применяют в сборных и монолитных конструкциях, работающих на знакопеременные усилия. В нашей стране эта югрессивная разновидность бетона не получила массового распространения, хотя используется на некоторых строительных объектах, например при возведении станций Московского и Санкт-Петербургского метрополитена для заполнения зазоров в металлических и железобетонных конструкциях,

на МКАД с использованием в их конструкциях стеклофибробетона. В других случаях, например на третьем транспортном кольце Москвы, стеклофибробетон используют в качестве несъемной опалубки-облицовки в тоннелях путепровода.

Глава 13 Теплоизоляционные материалы и изделия

13.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Теплоизоляционными называют строительные материалы, которые обладают малой теплопроводностью и предназначены для тепловой изоляции строительных конструкций жилых, производственных и сельскохозяйственных зданий, поверхностей производственного оборудования и агрегатов (промышленных печей, турбин, трубопроводов, камер холодильников и пр.). Эти материалы имеют небольшую среднюю плотность — не выше 600 кг/м^3 , что достигается повышением пористости.

В строительстве тепловая изоляция позволяет уменьшить толщину ограждающих конструкций (стен, кровли), снизить расход основных материалов (кирпича, бетона, древесины), облегчить конструкции и понизить их стоимость, уменьшить расход топлива в эксплуатационный период. В технологическом и энергетическом оборудовании тепловая изоляция снижает потери теплоты, обеспечивает необходимый температурный режим, снижает удельный расход топлива на единицу продукции, оздоравливает условия труда. Чтобы получить достаточный эффект от применения тепловой изоляции, в инженерных проектах производятся соответствующие тепловые расчеты, в которых принимаются конкретные разновидности теплоизоляционных материалов и учитываются их теплофизические характеристики. Эти мероприятия позволяют успешно решать проблему экономии топливно-энергетических ресурсов.

По основной теплофизической характеристике — теплопроводности — теплоизоляционные материалы делят на три класса: А — малотеплопроводные, Б — среднетеплопроводные и В — повышенной теплопроводности. Классы отличаются величиной теплопроводности материала, а именно: при средней температуре 25°C материалы класса А имеют теплопроводность до $0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, класса Б — от $0,06$ до $0,115 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$, класса В — от $0,115$ до $0,175 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. При других средних температурах измерения теплопроводность материала возрастает согласно следующей зависимости: $\lambda_t = \lambda_0 / (1 + \beta t)$, где λ_t — теплопроводность при температуре $t^\circ\text{C}$; λ_0 — теплопроводность при температуре 0°C ; β — температурный коэффициент, выражающий приращение теплопроводности материала при повышении его температуры на 1°C и равный $0,0025$ (до 100°C — по данным О.Е. Власова).

Наблюдаются исключения из этой зависимости, когда с повышением температуры материала теплопроводность его не повышается, а снижается, например у магнезитовых огнеупоров, металлов.

Самым характерным признаком теплоизоляционных материалов является их высокая пористость, поскольку воздух в порах имеет меньшую теплопроводность, чем окружающее его вещество в конденсированном состоянии (твердом или жидком). При величине пор $0,1$ — $2,0 \text{ мм}$ воздух имеет в них теплопроводность, равную $0,023$ — $0,030 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$. Пористость теплоизоляционных материалов может составлять до 90 и даже до 98% , а супертонкое стекловолокно имеет пористость до $99,5\%$. Между тем такие конструкционные материалы, как тяжелый цементный бетон, имеет пористость до 9 — 15% , гранит, мрамор — $0,2$ — $0,8\%$, керамический кирпич — 25 — 35% , сталь — 0 , древесина — до 70% и т. п. Поскольку пористость непосредственно влияет на величину средней плотности, теплоизоляционные материалы обычно различают не по пористости, а по средней плотности. Их делят на три группы: особо легкие ОЛ (и наиболее пористые), имеющие марку по средней плотности (в кг/м^3) в сухом состоянии 15 , 25 , 35 , 50 , 75 и 100 ; легкие (Л) — 125 , 150 , 175 , 200 , 225 , 300 и 350 и тяжелые (Т) — 400 , 450 , 500 и 600 . Материалы, имеющие среднюю плотность между указанными марками, относят к ближайшей большей марке. При средней плотности 500 — 700 кг/м^3 материалы используют с учетом их несущей способности в конструкциях, т. е. как конструкционно-теплоизоляционные. В целом же следует отметить, что ориентация на низкую

теплопроводность воздуха в порах хотя и обоснована, но не исключает поиска менее теплопроводных среднеинертных газов, вакуума и других условий работы материалов.

Теплопроводность резко возрастает при увлажнении теплоизоляционных материалов, так как теплопроводность воды равна $0,58 \text{ Вт/(м·К)}$, т. е. примерно в 25 раз выше, чем у воздуха. При замерзании увлажненного теплоизоляционного материала происходит дальнейшее увеличение его теплопроводности, поскольку теплопроводность льда составляет $2,32 \text{ Вт/(м·К)}$, т. е. в 100 раз больше, чем воздуха в тонких порах. Очевидно, что весьма важно предохранять теплозащитный слой в конструкциях и на оборудовании от увлажнения, тем более при возможном последующем замерзании влаги. Важным свойством утеплителя является морозостойкость при защите наружных ограждающих конструкций. Кроме различия теплоизоляционных материалов по теплопроводности и средней плотности они подразделяются также:

по виду исходного сырья — на неорганические и органические. К неорганическим относятся минеральная и стеклянная вата (и изделия из них), вспученный перлит и вермикулит (изделия из них), ячеистые бетоны, керамические теплоизоляционные изделия и др.; к органическим — древесноволокнистые и древесностружечные плиты, камышит, теплоизоляционные пластмассы и др.;

по форме материалов различают штучные (плиты, блоки, кирпич, цилиндры, сегменты), рулонные (маты, полосы, картон, матрацы), шнуровые (шнуры, жгуты) и сыпучие материалы (минераловат-ная смесь, вспученный перлит и др.);

по способности к сжимаемости под нагрузкой (относительной деформации сжатия) теплоизоляционные материалы делят на три вида: мягкие (М), имеющие сжимаемость свыше 30% под удельной нагрузкой $2 \cdot 10^3 \text{ Па}$, полужесткие (ПЖ) — соответственно — 6—30%, жесткие (Ж) — до 6%, повышенной жесткости — до 10% под удельной нагрузкой $4 \cdot 10^3 \text{ Па}$ и твердые — до 10% под удельной нагрузкой 10 кПа .

Теплоизоляционные материалы, применяемые в холодильных камерах, холодильниках, рефрижераторах, а также во влажных условиях, должны иметь повышенные био- и водостойкость. К этим важным материалам предъявляются и некоторые другие технические требования — стабильность физико-механических и теплотехнических свойств, предельно допустимое количество выделяемых токсических веществ, требования в отношении возгораемости, экономичности. Теплоизоляция должна выдерживать действие высокой температуры и открытого пламени в течение определенного времени. Важно определить предельную температуру применения материала, а также строго придерживаться ее при назначении теплоизоляционных изделий: керамических — до $1200\text{—}1300^\circ\text{C}$, трепельного кирпича — до 900°C , из ячеистого бетона и пеностекла — до 400°C , органических — $75\text{—}100^\circ\text{C}$.

Структура теплоизоляционных материалов характеризуется наличием твердой и газообразной фаз; нередко присутствует и жидкая фаза, например вода в свободном состоянии. Эти газообразная и конденсированные фазы участвуют в передаче теплоты; кроме того теплота передается через границы пор с твердым веществом.

Теплопередача пор складывается из теплопроводности газа в порах, конвективной передачи теплоты и теплоизлучения газа. Как отмечалось выше, теплопроводность воздуха при атмосферном давлении составляет при температуре 25°C около 0,025, при температуре 100°C — 0,031 и при температуре 1000°C — 0,079 Вт/(м·К) . Такие же примерно значения теплопроводности имеют азот, кислород, а водород $0,20 \text{ Вт/(м·К)}$. Эти значения теплопроводности учитывают при работе теплоизоляционного материала в соответствующей газовой среде.

Второе слагаемое общей теплопередачи пор — конвекция, в порах размером меньше 5 мм она практически отсутствует и поэтому не учитывается. Но при большей величине пор или их непрерывности конвекция становится больше.

Третье аддитивное слагаемое теплопередачи — теплоизлучение зависит от черноты стенок пор, формы и размера пор, температуры. Величина излучения имеет большое

значение при передаче теплоты в порах, особенно при высоких температурах, так как она пропорциональна кубу температуры. В результате может оказаться, что теплопередача при высокой температуре высокопористых изделий будет выше, чем менее пористых.

Твердая фаза имеет большую теплопроводность и поэтому, когда она является в структуре непрерывной, теплопроводность материала оказывается в 2 — 2,5 раза выше, чем при непрерывности пор. В волокнистых теплоизоляционных материалах непрерывными в структуре являются как твердые фазы, так и поры, поэтому их теплопроводность весьма значительно зависит от лучистой составляющей теплопроводности.

С учетом физических факторов, влияющих на общую или эффективную теплопроводность в гетерогенных пористых телах, на практике и в теории были предложены основные способы получения теплоизоляционных материалов: пористо-волокнистых (минеральной и стеклянной ваты, древесноволокнистых материалов с применением асбеста и др.), пористо-зернистых (перлитовых, вермикулитовых, известково-кремнеземистых и др.); ячеистых (газобетонов, пенобетонов, пеностекла, пенопластов и др.). Различие между ними не только в составе и структуре конечного продукта, но и в технологическом способе поризации.

13.2. СПОСОБЫ ПОРИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

К главнейшим искусственным способам поризации материалов с приданием им теплозащитных свойств относятся следующие.

Способ газообразования основан на введении в сырьевую смесь компонентов, которые способны вызвать химические реакции с выделением в больших количествах газовой фазы. Газы, стремясь выйти из твердеющей пластической массы, образуют пористую структуру материала — газобетона, газосиликата, газокерамики, ячеистого стекла, газонаполненной пластмассы и др.

В качестве химических газообразователей используются алюминиевая пудра и техническая перекись водорода (пергидроль). Алюминиевая пудра в результате реакции с гидроксидом кальция способствует выделению большого количества молекулярного водорода (см. 9.4.4). Пергидроль легко разлагается в щелочной среде с образованием молекулярного кислорода (см. 9.4.4). В обоих случаях вспучивается цементное тесто. Аналогично в расплавленные стекла и смолы вводятся реагенты, способствующие образованию газов CO_2 , N_2 и др.

Способ пенообразования основан на введении в воду затворения вяжущих пенообразующих веществ. Стабилизированные пузырьки пены представляют собой воздушные поры пенобетона, пеносиликата, пенокерамики и др. В качестве стабилизаторов пены для повышения ее стойкости до момента отвердевания вяжущего используются столярный клей, сернокислый глинозем, смолы и др. Пенообразователями служат соли жирных кислот — натриевые и калиевые мыла, мыльный корень и извлекаемый из него сапонин; клееканифольный пенообразователь, получаемый из канифольного мыла (соль абиетиновой кислоты $\text{C}_{19}\text{H}_{39}\text{COOH}$); алюмосульфонафтенный пенообразователь, получаемый из керосинового контакта и сернокислого глинозема; гидролизованная кровь (ГК), получаемая путем обработки отходов мясокомбинатов по схеме техническая кровь + едкий натр + железный купорос + хлористый аммоний.

Способ повышенного водозатворения состоит в применении большого количества воды при приготовлении формовочных масс (например, из трепела, диатомита) и последующего ее испарения с сохранением пор при высушивании. Этот способ применяют в производстве древесноволокнистых плит, торфяных, асбесто-трепельных и других материалов.

Способ вспучивания заключается в нагревании до высоких температур некоторых горных пород и шлаков. Из сырья выделяются газы или водяные пары главным образом в связи с отделением химически связанной или цеолитной воды. При способе вспучивания сырьем служат перлит и обсидиан, вермикулит, некоторые разновидности глин, в особенности содержащие легкоплавкую закись железа (FeO). Эти и некоторые другие сырьевые материалы после вспучивания образуют соответствующие высокопористые теплоизоляционные материалы — вспученные перлит и вермикулит, керамзит, шлаковую пемзу и др. Так, например, при быстром нагревании вермикулит (высокогидратированный алюмосиликат магния — см. гл. 8) расщепляется на отдельные слюдяные пластинки, которых в 1 см^3 насчитывается до 200 тыс. шт. (рис. 13.1). При этом зерна вермикулита сильно вспучиваются вследствие обильного выделения из минерала при нагревании химически связанной воды. Раздвигая пластинки, поры увеличивают объем зерен в 20—30 раз и более. Вспученный вермикулит характеризуется малой насыпной плотностью ($80\text{—}150\text{ кг/м}^3$), низкой теплопроводностью $\lambda = 0,09\text{—}0,12\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Обжиг производится во вращающихся и шахтных печах при быстром подъеме температуры до $800\text{—}1000^\circ\text{C}$ и последующем охлаждении. Аналогичное увеличение объема при вспучивании происходит и при быстром нагревании в печах перлита (высококремнеземистой породы — см. гл. 8). Насыпная плотность вспученного перлитового щебня составляет $160\text{—}500\text{ кг/м}^3$. Пористость вспученного перлита может достигать 88—90% и более.



Рис. 13.1. Вермикулит зернистый обожженный

Способ распушения заключается в изготовлении из сравнительно плотного минерального сырья волокнистого материала в виде бесформенной массы с возможным последующим приданием ей формы изделий. Наибольшее распространение этот способ получил в производстве минеральной и стеклянной ваты и изделий из них. Сырьем для минеральной ваты служат пегматиты, туфы и другие горные породы и металлургические шлаки, а для изготовления стеклянной ваты используют стеклянный бой и отходы стекла на стекольных заводах. Способом распушения получают также органические теплоизоляционные материалы — хлопковую и шерстяную вату ватные изделия (ватин, войлок), древесные волокна и др.

В нашей стране наибольшее применение в строительстве находит минеральная вата в связи с доступностью местного сырья. Для оценки пригодности сырья определяют его химический состав и модуль кислотности. В общем случае оптимальный химический состав шихты: SiO_2 — 40—42%, Al_2O_3 — 12%, Fe_2O_3 — 3—4%, CaO — 30%, MgO — 10—12% при модуле кислотности $M = 55:45 = 1,22$. Рекомендуемые пределы модуля кислотности 0,6—1,5, при значениях которого толщина волокон ваты составляет 2—10 мкм, тогда как при его увеличении ухудшается вата, и волокна достигают толщины 10—40 мкм.

Самым распространённым способом плавки шихты является ваграночный, применение ванн пламенных и электрических печей более ограничено. Вагранка — шахтная цилиндрическая печь из листовой стали и футерованная изнутри шамотным кирпичом. В зависимости от производительности вагранки диаметр шахты, куда загружают шихту, составляет от 750 до 1250 мм при высоте, в 425 раз большей диаметра. Охлаждение шахты в зоне плавления производится с помощью водяной рубашки. Максимальная температура газов в вагранке достигает 1700°C и выше, что зависит от интенсивности горения кокса. Вязкость вытекающего расплава составляет не более 2,0—2,5 Па·с, что регулируется добавлением в шихту плавней.

Существует несколько способов переработки расплавов в минеральную вату, но к основным относятся дутьевой и центробежный.

При дутьевом способе расплав попадает на желоб и рассекатели. Вертикальная струя расплава разбивается струей пара или воздуха, поступающих к соплу под давлением 0,6—0,8 МПа и выходящих из сопла со скоростью 700—800 м/с. При встрече со струей расплава образуются капли, вытягивающиеся в цилиндрики и грушевидные тела. Дальнейшее удлинение грушевидных тел приводит к образованию нитей из расплава при раздуве. Часть волокон не успевает оформиться и остается близкой по форме к каплям-шарикам, называемым корольками. С увеличением давления и скорости истечения уменьшается количество нежелательных корольков в вате. Волокна, образовавшиеся при раздуве, увлекаются в специальную камеру и там осаждаются. В нижней части камеры установлен сетчатый конвейер, оканчивающийся валиками для подпрессовки ваты. Для

придания эластичности волокна опрыскивают синтетическим связующим или битумом, что позволяет придавать вате форму матов, плит и др.

При переработке расплава центробежным способом струя направляется на горизонтально расположенный диск с радиальными насечками (канавками). Диск насажен на вертикальный вал, который от мотора передает вращательное движение диску со скоростью 3500—4000 об/мин. Под влиянием центробежной силы струя, стекая по канавкам с диска, разбрасывается в виде тончайших нитей, прижимаемых сжатым воздухом к корпусу установки. Волокно из центробежной установки переносят к прессу и прессуют его в кипы или направляют на формование изделий.

Качество минеральной ваты характеризуется средней плотностью от 50 до 125 кг/м³, пористостью — до 90%, теплопроводностью — 0,038—0,043 Вт/(м·К) при температуре 25±5°С.

Дутьевым и центробежным способом получают также стекловату (см. 18.5), а направленное стекловолокно — способом непрерывного вытягивания нити из отверстий (фильер) жароупорной пластины (фильерный способ). Получаемые нити отличаются высокой прочностью на растяжение: при диаметре 4—5 мкм прочность составляет до 50 МПа.

Способом распушения получают асбест, а затем асбестовый материал, являющийся хорошим теплоизолятором, особенно в виде асбестовых бумаги, картона, войлока, а также пластичных смесей и изделий на основе вяжущих.

Известен еще один способ поризации теплоизоляционных материалов — способ *выгорающих органических веществ*, вводимых в сырье как порообразующие добавки, в частности, при производстве керамических теплоизоляционных изделий. К керамическому сырью — диатомиту, трепелу, глине и т. п. — добавляют опилки, дробленый уголь, торф, лигнин и др., а для мелкой и равномерной пористости — нафталин, который при нагревании полностью улетучивается (возгоняется). На выгорании органического «ядра» из сферической минеральной оболочки основано производство полого шарообразного заполнителя — керамического вакулита (рис. 13.2). Этот способ позволяет использовать невспучивающееся сырье, учитывая дефицитность вспучивающихся глин. Насыпная плотность вакулита — до 300 кг/м³; используют в теплоизоляционных и конструктивно-теплоизоляционных легких бетонах.

Кроме свойств, упоминавшихся выше (теплопроводности, прочности, средней плотности), следует отметить еще ряд свойств теплоизоляционных материалов, обуславливающих их качество.

Температуростойкость и стойкость к термической деструкции характеризуют способность материала выдерживать длительный нагрев при высокой температуре без изменения своего состояния. От этого свойства зависит максимальная температура применяемого материала, например минеральной ваты каолинового состава — до 1150°С, вспученного перлита — до 900°С, обычной минеральной ваты — до 600°С. Огнестойкость характеризует способность воспламеняться и гореть.

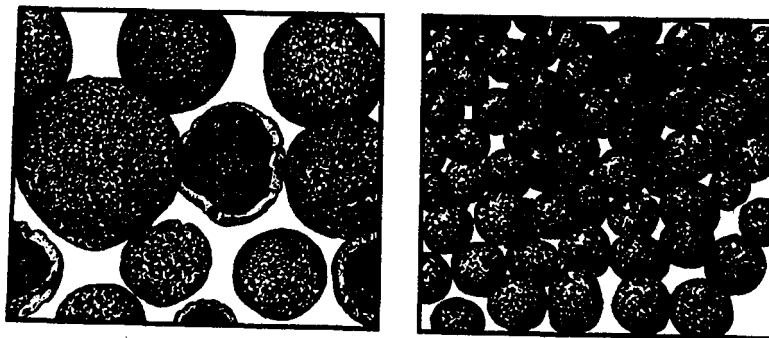


Рис. 13.2. Вакулит разного размера (из разработок А.И. Петриковой)

Влагопоглощение — способность поглощать, а водоудерживающая способность — удерживать влагу при контакте с ней. Вместе с другими свойствами — водостойкостью, гигроскопичностью, водопроницаемостью — они отражают важные стороны качества теплоизоляционных материалов и изделий.

Вода отрицательно влияет и на теплозащитные свойства материалов, и на его долговечность в конструкциях. Устраивают защитные покрытия по теплоизоляции из стеклопластиков, алюминиевой фольги и др.

13.3. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

К группе неорганических теплоизоляционных материалов относятся: минеральная и стеклянная вата и изделия из них; ячеистое стекло (пеностекло); легкие бетоны с применением вспученных перлита и вермикулита; ячеистые теплоизоляционные бетоны; асбестовые и асбестосодержащие материалы; керамические теплоизоляционные изделия и огнеупорные легковесы. Отличительной особенностью неорганических теплоизоляционных материалов является их достаточная огнестойкость, малая гигроскопичность, неподверженность загниванию, низкая теплопроводность.

Минеральная вата применяется для теплоизоляции холодных (до -200°C) и горячих (до 600°C) поверхностей. Укладка ваты слоем — сравнительно трудоемкий процесс, поэтому ее чаще при засыпной изоляции превращают в гранулы во вращающемся дырчатом барабане. Однако основными видами изделий с применением минеральной ваты являются плиты полужесткие и жесткие на битумном и синтетическом (полимерном) связующем. Битумы для плит полужестких, мягких и войлока применяют с температурой размягчения 50°C и выше; из синтетических смол наибольшим применением пользуется фенолоформальдегидная водоэмульсионная или мочевиноформальдегидная смолы. Волокна минеральной ваты смешивают со связующим веществом и из полученной массы при давлении и нагревании формируют изделия.

Из минеральной ваты изготавливают плиты теплоизоляционные на синтетическом связующем (фенолоспирте, растворе карбамидно-го полимера и др.) марок 50, 75, 125, 175, 200, 300 (по средней плотности). Длина плит 1000 мм, ширина 500; 1000 мм; толщина от 60 до 100 мм. Предел прочности при сжатии (при 10%-ной деформации) должен быть не менее 0,04 МПа для марки 300; предел прочности при растяжении — не менее 0,01 МПа для марок 50 и 75, предел прочности при изгибе — не менее 2 и 4 МПа соответственно для марок 200 и 300. Содержание синтетического связующего от 1,5 до 8% для плит разных марок.

Теплоизоляционные плиты из минеральной ваты на битумном связующем выпускают марок: 75, 100, 150, 200, 250. Теплопроводность плит первой категории качества при температуре $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ должна быть не более 0,046—0,064 Вт/(м·К). Предел прочности на растяжение при изгибе для плит марок 200 и 250 первой категории качества соответственно не менее 0,1 и 0,12 МПа, а предел прочности при растяжении для плит марок 75 и 100 соответственно не менее 0,0075 и 0,008 МПа. Содержание битумного связующего вещества в плитах разных марок составляет 5—18%.

Плиты минераловатные повышенной жесткости, изготавливаемые по технологии мокрого формования гидромассы или пульпы, должны иметь среднюю плотность не более 200 кг/м³, теплопроводность — не более 0,052 Вт/(м·К) при расходе синтетического связующего не более 10%, предел прочности при сжатии (при 10%-ной деформации) не менее 0,1 МПа.

К полужестким, гибким минераловатым изделиям относят плиты и скорлупы, маты и войлочные изделия, получаемые уплотнением ваты, обработанной битумом или синтетическим связующим веществом. Выпускают прошивные маты длиной до 2500 мм, шириной до 1000 мм и толщиной 40—120 мм. По средней плотности они делятся на марки 75, 100, 125, 150, а прошивают их суровыми нитями, шпагатом, стеклянными нитями или проволокой. Эти маты выпускают с обкладками с одной или двух сторон или без обкладок. Обкладочные материалы: упаковочная бумага, металлические сетки, ткани асбестовые, стеклосетки и др.

Как и другие, теплоизоляционные материалы должны обладать определенной прочностью, хотя и не высокой, но достаточной для монтажных работ и сохранения формы изделий.

Из минеральной ваты на синтетическом связующем изготавливают цилиндры и полуцилиндры для теплоизоляции трубопроводов с температурой поверхности от 180 до

400°С. По средней плотности они подразделяются на марки: 100, 150, 200. Длина их 500, 1000 мм, толщина 40—80 мм, внутренний диаметр 18—219 мм. Теплопроводность при температуре 25±5°С — 0,041—0,045 Вт/(м·К), а при 125°С — 0,058 Вт/(м·К). Предел прочности при растяжении для изделий разных марок не менее 0,015—0,025 МПа (рис. 13.3).

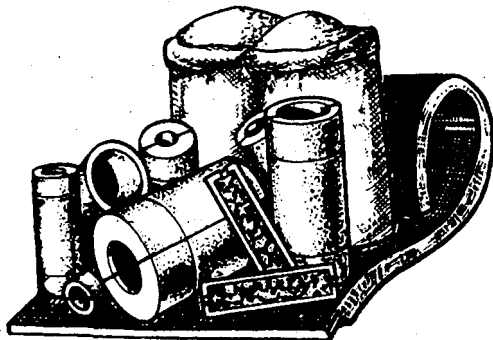


Рис. 13.3. Минеральная вата и готовые элементы теплоизоляции из нее

Стеклянная вата и изделия из нее обладают примерно теми же свойствами, что и минеральные. Эту разновидность ваты применяют для теплоизоляции поверхностей промышленного оборудования, трубопроводов с температурой до 450°С, изделия в виде плит, матов, скорлуп — для теплоизоляции ограждающих конструкций зданий и поверхностей промышленного оборудования при температуре до 200—450°С в зависимости от связки. В зависимости от назначения и средней плотности они подразделяются на марки: ПЖС-175 и ПЖС-200 (плиты жесткие строительные); ПП-50 и ППС-75 (плиты полужесткие строительные); ППТ-40; ППТ-50; ППТ-75 (плиты полужесткие технические); МС-35, МС-50 (маты строительные); МТ-35 и МТ-50 (маты технические). По соглашению с потребителем изделия могут быть оклеены с одной или двух сторон стеклотканью, алюминиевой фольгой, синтетической пленкой и другими материалами. Они могут использоваться также в звукоизоляционных и звукопоглощающих конструкциях.

Ячеистое стекло — блоки и плиты, получаемые из измельченного в порошок стекла (стеклянного боя, эрклеза) в смеси с газообразователем (известняком, антрацитом) и при обжиге (900—1000°С). Марки по средней плотности 200 и 300; теплопроводность при температуре 25°С — 0,09—0,10 Вт/(м·К), предел прочности при сжатии 0,5—3,0 МПа. Плиты имеют пористость до 85—95%, размеры по длине 500 мм, ширине 400 мм, толщине 80—140 мм. Их применяют в качестве теплоизоляции ограждающих конструкций зданий (вкладыши в стеновых панелях). Они поглощают не только теплоту, но и звуковые волны.

Вспученные перлит и вермикулит составляют эффективные сыпучие теплоизоляционные материалы для засыпок и набивок полостей, но особенно в качестве заполнителей легких бетонов и растворов, применяемых в монолитном и сборном строительстве. Из вспученного перлита с применением минеральных или органических связующих веществ получают жароупорный перлитобетон с частичным введением в него молотого перлита для температур 500—700°С; перлитобетон — без добавления перлитовой молотой муки; поливинилацетатоперлит; мочевиноформальдегидоперлит и др.; изделия из керамзитоперлитобетона, силикатоперлитовые, гипсоперлитовые, перлитцементные, перлитобитумные изделия и т. п. Из вспученного вермикулита в нашей стране вырабатывают асбестовермикулитоперлитовые плиты и сегменты и асбестовермикулитовые плиты, скорлупы и сегменты на основе связующих веществ с применением асбеста и других добавок. Вермикулитобетон марки 50 применяют для изготовления трехслойных

панелей. С использованием вспученных перлита и вермикулита можно получать материалы трех групп: 1) рядовая изоляция с температурой применения до $+200^{\circ}\text{C}$ — песок и пудра, перлитобитумная изоляция, перлитопластбетоны, лигноперлит; 2) среднетемпературная изоляция (до $+600^{\circ}\text{C}$) — перлитцементы, обжиговый легковес, термоперлит; 3) высокотемпературная изоляция ($800\text{—}1000^{\circ}\text{C}$) — эпсоперлит, перлитокерамические изделия, жароупорный перлитобетон, перлито-фосфатные изделия, перлитовые огнеупоры и др.

Ячеистые бетоны и силикаты применяют в качестве теплоизоляционных материалов и изделий при средней плотности ниже 400 кг/м^3 . По виду примененного порообразователя и вяжущего вещества их называют газобетонами, газосиликатами, пенобетонами, пеносиликатами. Эти бетоны могут быть со смешанным порообразователем и тогда их называют пеногазобетонами, пеногазосиликатами, керамзитопенобетонами и т. п. Из ячеистых бетонов обычно изготовляют плиты длиной до 1000 мм, шириной 400, 500, 600 мм, толщиной 80—240 мм. Их марки по средней плотности 350 и 400 кг/м^3 , а предел прочности при сжатии для изделий первой категории качества не менее 0,7—1 МПа и $> 0,8\text{—}1\text{ МПа}$ для изделий высшей категории качества; теплопроводность в сухом состоянии при температуре 25°C составляет 0,093—0,104 Вт/(м·К) и менее.

Плиты из ячеистых бетонов применяют для теплоизоляции стен (рис. 13.4, а, б, в) и перекрытий, укрытия поверхностей заводского оборудования и трубопроводов (пластичные бетоны и растворы).

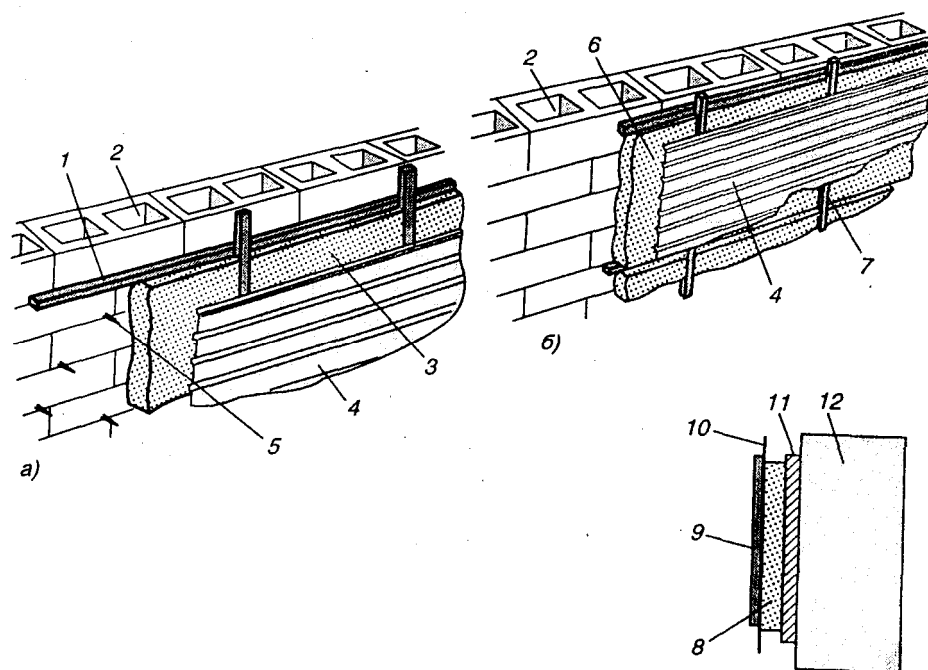


Рис. 13.4. Утепление стен:

а — снаружи минеральной ватой и вагонкой; б — снаружи плитным утеплителем; в — внутренней теплоизоляцией — жестким утеплителем; 1 — брус; 2, 12 — стена; 3 — минвата; 4 — вагонка; 5 — штырь; 6 — теплоизоляция; 7 — каркас; 8 — утеплитель; 9 — отделка; 10 — пергамин; 11 — рейка

Асбестовые и асбестосодержащие теплоизоляционные материалы представлены асбестовой бумагой, картоном, шнурами разного диаметра и пр., плитами, скорлупами, сегментами и др., мастичными изоляциями с применением порошков.

Штучные асбестоцементные теплоизоляционные изделия изготовляют из смеси распушенного асбеста V и VI сортов и цемента не ниже марки 300 с помощью прессования и сушки. Допускается частично заменять асбест минеральной ватой, а цемент — известково-трепельным вяжущим веществом. Изделия в виде плит ($1000\times 500\times 30\text{ мм}$), скорлуп (длиной 500 мм при толщине 30—40 мм) и сегментов (длиной 500 мм при

толщине 50—80 мм) вырабатывают по средней плотности марок 400 и 450, прочностью при изгибе соответственно 0,2 и 0,25 МПа и теплопроводностью 0,08—0,09 Вт/(м·К). Используют для тепловой изоляции поверхностей промышленного оборудования и трубопроводов при температуре до 450°C (рис. 13.5).

С меньшей средней плотностью получают асбестовермикулито-вые изделия путем прессования и сушки гидромассы, состоящей из асбеста, вспученного вермикулита и связующих веществ. Предусмотрены три марки — 250, 300 и 350 по средней плотности (в кг/м³). Длина плит 500 и 1000 мм, ширина 500, толщина 40—100 мм, скорлупы и сегменты имеют длину 500 мм, толщину 40 и 50 мм. Их применяют при температуре изолируемых поверхностей до 600°C (рис. 13.6). Предел прочности при изгибе — не менее 0,8— 0,25 МПа (для разных марок), влажность — не более 5%.

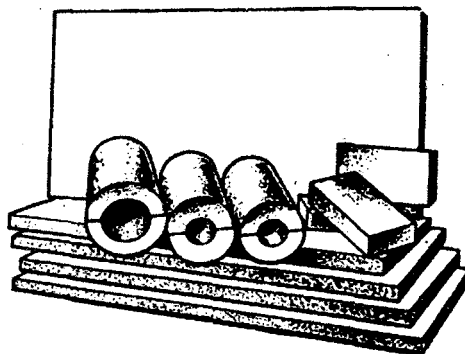


Рис. 13.6. Изделия из асбестовермикулита

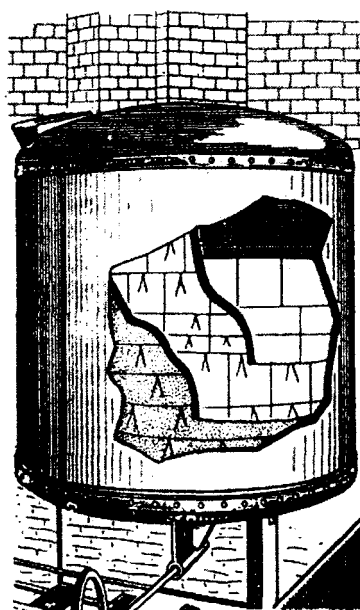


Рис. 13.5. Тепловая изоляция промышленного оборудования с помощью асбестоцемента

Многие асбестосодержащие теплоизоляционные материалы, кроме асбестового волокна, содержат 70—85% наполнителя — диатомита, трепела, магнезита и др. Целесообразно добавлять в такие смеси отходы асбошиферного производства. Представителями этой группы материалов являются асбестотрепельные (асбозурит, асботермит), асбестоизвестководиатомитовые (вулканит), иногда с частичной заменой асбеста гипсом, асбестомagneзиальные (ньювель), асбестодоломитовые (совелит) и др. С применением этих материалов изготовляют главным образом мастичную изоляцию, реже изделия. Свежеотформованные изделия направляют в сушильные камеры, в которых они высыхают при температуре 200°C. Плиты маркируют в зависимости от средней плотности,

определяют их прочность и теплопроводность, которые соответствуют теплоизоляционным материалам достаточно высокого качества.

Особенно часто совелитовые плиты, скорлупы и сегменты используют при температурах не выше 550°C (начало разложения углекислого кальция, содержащегося в высушенном совелите). Находят широкое применение также другие разновидности асбестосодержащих материалов.

13.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Органические теплоизоляционные материалы изготавливают с применением растительного сырья и отходов (побочных продуктов) лесного и сельского хозяйства. Для этих материалов с успехом используют древесную стружку, горбыли, рейки, опилки, камыш, костру, торф, очесы льна, конопли и др. Другой важной разновидностью органических теплоизоляционных материалов являются полимерные, получаемые на основе термопластичных и термореактивных полимерных материалов.

К основным теплоизоляционным материалам с применением растительного сырья относятся древесностружечные, древесноволокнистые, фибролит, арбрлит, камышит, торфяные, войлочные (войлок, пакля, шевелин и др.).

Древесностружечные плиты — искусственный строительный конгломерат в форме плит, изготавливаемый горячим прессованием смеси измельченной древесной стружки с полимерными веществами, выполняющими функции связующего компонента. В качестве связующего вещества применяют термореактивные смолы: мочевиноформальдегидные, фенолоформальдегидные и др. Для улучшения свойств плит в них вводят гидрофобизирующие (парафиновая эмульсия), антисептирующие и другие добавки. Количественные соотношения компонентов устанавливают с тем расчетом, чтобы в данных технологических условиях получать плиты оптимальной структуры, но обычно органическое сырье составляет до 85—90% по массе. Древесностружечные плиты различают легкие со средней плотностью 250—400 кг/м³, полутяжелые — средняя плотность 400—800 кг/м³ и тяжелые — свыше 800 до 1200 кг/м³. Понятно, что для теплоизоляционных целей используют легкие плиты; их коэффициент теплопроводности от 0,046 до 0,093 Вт/(м·К). Более тяжелые древесностружечные плиты прочностью при изгибе от 5 до 35 МПа применяют как отделочный материал. Плиты крепят к конструкциям на гвоздях и на специальных мастиках. В отличие от деловой древесины получаемые плиты обладают изотропностью по свойствам и структуре, что облегчает их использование в строительстве.

Древесноволокнистые плиты — разновидность ИСК, изготавливаются из отходов дровяной древесины путем ее измельчения в рубильной машине и расщепления в дефибраторе в волокнистую массу. К древесной массе добавляют улучшающие, например гидрофобизирующие (парафиновая эмульсия) или антисептирующие, вещества, и из нее отливают плиты. Их прессуют и сушат при температуре до 165—180°C.

В зависимости от $R_{изг}$ и технологических особенностей изготовления древесноволокнистые плиты разделяют на сверхтвердые, твердые, полутвердые и мягкие, а также твердые плиты отделочные, имеющие различное назначение. Твердые плиты имеют среднюю плотность не менее 850 кг/м³, а прочность на изгиб — не менее 3,5—4 МПа. Для теплоизоляции используют мягкие плиты со средней плотностью не более 150—350 кг/м³ с теплопроводностью не более 0,064—0,1 Вт/(м·К) (в сухом состоянии). Размер мягких плит: длина 1200—3000 мм, ширина 1200—1700 мм, толщина 8, 12, 16 и 28 мм, предел прочности при изгибе не менее 0,4; 1,2; 2,0 МПа (соответственно для марок М-4, М-12, М-20).

Древесноволокнистые плиты этих разновидностей используют в строительстве как изоляционный материал, не поражаемый домовыми грибами, для обшивки стен и потолков (именуется как сухая штукатурка из оргалита), утепления кровельных покрытий, дверных проемов и т. п. Они крепятся к конструкциям с помощью специальных мастик, гвоздей или шурупов. При необходимости их размер может быть увеличен, например, до 3х1,6 м, что ускоряет строительные работы на объекте (рис. 13.7). Древесноволокнистые плиты твердые с лакокрасочным покрытием (декоративные с печатным рисунком либо одноцветные) применяют для отделки жилых, общественных, промышленных зданий, транспорта, мебели, дверных полотен.

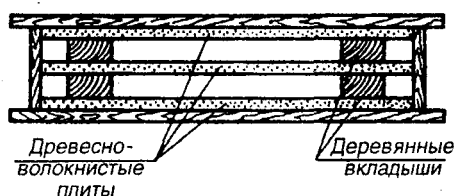


Рис. 13.7. Разрез стены, утепленной древесноволокнистыми плитами

Фибролит является ИСК, изготавливаемым на основе неорганических вяжущих веществ (портландцемента, магнезиальных вяжущих) с применением в качестве заполняющего (армирующего) компонента древесной шерсти. Так называют тонкую древесную стружку лентообразного вида специального назначения, получаемую на станках из коротких обрезков сосны, ели, липы, березы или осины. Древесную шерсть подвергают «минерализации», т. е. обработке химическими веществами (хлористым кальцием, жидким стеклом или серноокислым глиноземом и др.). Минерализаторы, проникая в древесную шерсть, уменьшают вредное действие Сахаров, содержащихся в древесине. После минерализации древесную шерсть смешивают с определенными количествами вяжущего вещества и воды и из смеси формуют плиты под давлением до 0,5 МПа. Отформованные плиты в течение суток отвердевают в пропарочных камерах при нормальном давлении и температуре 30—35°C с последующей их сушкой до влажности не более 20%.

Исследованиями установлено, что цементный камень в фибролите оптимальной структуры, особенно в контактных зонах, имеет повышенное содержание гидратных новообразований $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$, CaCO_3 , $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ по сравнению с цементным камнем при неоптимальной структуре фибролита. В связи с этим обеспечивается повышение прочности цементного камня как каркаса фибролита. Так, например, по данным М.М. Чернова, плотность, прочность, модуль упругости фибролита при оптимальных структурах как при кратковременном, так и при длительном воздействии нагрузки в 1,2—1,4 раза превосходят эти же показатели этого материала, не имеющего оптимальности структуры.

Обычная длина плит 3000 и 2400 мм, ширина 600 и 1200 мм при толщинах от 30 до 150 мм. Плиты разделяют по средней плотности на марки 300 (т. е. теплоизоляционный фибролит), 400 и 500 (теплоизоляционно-конструкционный фибролит) (в кг/м^3) с пределом прочности при изгибе не менее 0,35—1,3 МПа в зависимости от марки и толщины плиты и теплопроводностью не более 0,08—0,10 Вт/(м·К).

Используют фибролит для утепления стен и покрытий; так, стена из фибролитовых плит толщиной 15 см равноценна по теплосопrotивлению кирпичной стене из двух кирпичей.

Арболит — ИСК, полученный из правильно подобранной смеси цемента, древесного заполнителя, химических добавок и воды. По своей структуре он представляет собой разновидность легкого бетона, матричной частью в котором является цементный камень. Имеются обоснованные предложения о замене портландцемента, подверженного коррозии при действии экстрактивных веществ и целлюлозы с образованием водорастворимых сахаратов кальция, на высокопрочный гипс (α -модификация гипса). В этом случае в отдельных районах может потребоваться штукатурный слой по арболитовой ограждающей конструкции, так как гипс не вполне водостойкий материал, тем более если он долго не просыхает. Вместе с тем практически отпадает необходимость в замачивании древесной-дробленки и щепы в минерализаторах — водных растворах хлористого кальция или растворимого силикатного стекла. Пример технологической схемы производства арболитовых изделий способом силового вибропроката представлен на рис. 13.8. Мощность завода по такой технологии составляет до 40 тыс. м^3 изделий в год [1].

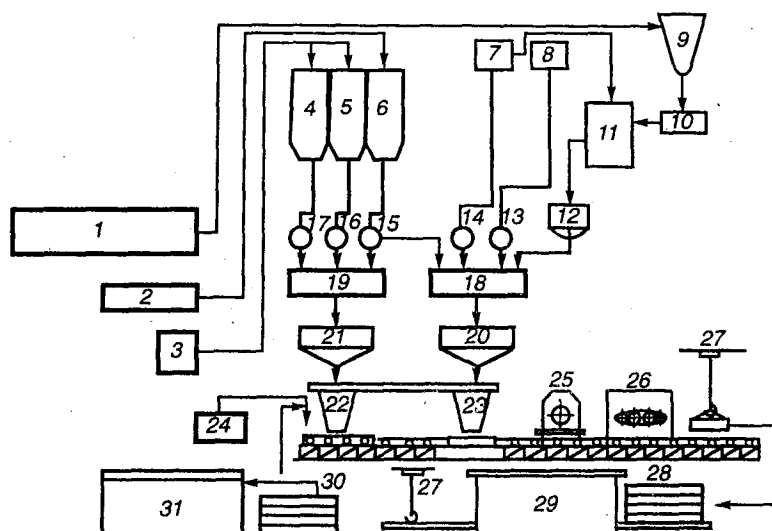


Рис. 13.8. Технологическая схема производства арболитовых изделий способом силового вибропроката:

1 — цех подготовки древесной дробленки; 2 — склад цемента; 3 — склады щебня и песка; 4 — бункер для щебня; 5 — бункер для песка; 6 — бункер для цемента; 7 — бак для воды; 8 — бак для раствора хлористого кальция; 9 — бункер древесной дробленки; 10 — весы; 11 — ванна для замачивания дробленки; 12 — пересыпной бункер; 13 — дозатор для раствора хлористого кальция; 14 — дозатор воды; 15 — дозатор цемента; 16 — дозатор песка; 17 — дозатор щебня; 18 — мешалка для арболитовой смеси; 19 — бетономешалка; 20 — бункер для арболитовой смеси; 21 — бункер для бетонной или растворной смеси; 22 — бетоно- или раствороукладчик; 23 — арболитоукладчик; 24 — арматурное отделение; 25 — вибровалок; 26 — прокатная секция; 27 — кран-балка; 28 — стопа арболитовых изделий; 29 — камера термообработки; 30 — пост распалубки; 31 — склад готовой продукции

Арболит вырабатывают теплоизоляционным со средней плотностью до 500 кг/м^3 и конструкционным со средней плотностью $500\text{—}850 \text{ кг/м}^3$. Марки теплоизоляционного арболита М5, М10, М15; марки конструкционного арболита М25, М35, М50. Теплопроводность арболита колеблется в пределах $0,07\text{—}0,17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ в зависимости от вида заполнителя (древесный, стебли хлопчатника, солома и др), а прочность при изгибе — от $0,4$ до $1,0 \text{ МПа}$. Этот материал применяют в стеновых конструкциях и как теплоизоляцию в стенах, перегородках и покрытиях зданий, особенно малоэтажных сельскохозяйственного назначения.

Камышит и камышитовые плиты получают из стеблей камыша и тростника путем прессования и скрепления стальной проволокой поперек стеблей. Применяют для заполнения каркасных стен и перегородок.

Камыш является растительным веществом, по химическому составу он близок к древесине (см. гл. 6). Стебли камыша содержат до 43% целлюлозы, 24% лигнина и свыше 20% пентазанов, поэтому камышит подвержен гниению в условиях повышенной влажности. Возможна и коррозия проволоки, скрепляющей плиты. Камышитовые плиты изготавливают длиной $2400\text{—}2600 \text{ мм}$, шириной $550\text{—}1500 \text{ мм}$, толщиной $30\text{—}100 \text{ мм}$.

В зависимости от степени подпрессовки средняя плотность плит колеблется в пределах $175\text{—}250 \text{ кг/м}^3$ при теплопроводности от $0,055$ до $0,095 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Из теплоизоляционных материалов камышит наиболее дешевый, но менее огнестоек, хотя, будучи спрессованным, он не горит открытым пламенем, но может длительное время тлеть. Его существенные недостатки — подверженность порче грызунами, гниваемость и плохая гвоздимость. Необходимо оштукатуривать камышитовые стены и перегородки с обеих сторон. В сухих условиях эти плиты в конструкциях относятся к долговечным материалам. В качестве антисептирующих веществ используют фтористый натрий, кремнефтористый аммоний и др. Транспортируют плиты в крытых вагонах или под брезентом плашмя и без свеса концов.

Торфяные теплоизоляционные плиты, скорлупы и сегменты производят из малоразложившегося торфа, сохранившего волокнистое строение. С этой целью торфяную массу доводят смешением до однородного состояния с добавлением (или без добавления) антисептиков, антипиренов, гидрофобизаторов, заполняют ею металлические формы и прессуют. Отпрессованные изделия подвергают тепловой обработке при температуре 120—150°C. В процессе тепловой обработки из торфа выделяются смолистые вещества, которые склеивают волокна без внесения каких-либо дополнительных вяжущих веществ. Размеры плит 1000х500х30 мм (выпускаются плиты шириной и 1000 мм), а марки по средней плотности равны: 170,200,230,260, что обеспечивает величину теплопроводности в пределах 0,052—0,075 Вт/(м·К), а предел прочности при изгибе — не менее 0,4 МПа.

Торфяные плиты применяют для утепления стен и перегородок в зданиях III класса, а также для изоляции поверхностей промышленного оборудования и трубопроводов при температурах в пределах от -60 до +100°C, однако следует учитывать их высокую гигроскопичность и водопоглощаемость.

Войлочные материалы изготавливают из грубой конской или коровьей шерсти с примесью льняной пакли. Пакля представляет собой спутанное волокно, получаемое как отход при мытье и трепании льна. В мягкой пакле допускается небольшое содержание костры, но не должно быть гнилостного запаха. Шерстяной войлок выпускают в виде прямоугольных полотнищ длиной 1 и 2 м, шириной 1 м при толщине 10 и 15 мм. Его средняя плотность 100—300 кг/м³, теплопроводность 0,045—0,065 Вт/(м·К). Войлок используют при утеплении стен и потолков, помещая его под штукатурку, которую устраивают по древесной драни, при утеплении оконных и дверных коробок, наружных дверей и углов в рубленых домах.

Войлок не гниет и не горит, но он может тлеть, имеет большое водопоглощение, служит средой для размножения моли. Паклю используют в просмоленном (уплотнение пазов водохозяйственных сооружений) и в не просмоленном (для конопатки бревенчатых стен) состоянии.

Простейшим теплоизоляционным материалом из льняной пакли является шевелин — слой пакли, помещенный между двумя листами беспокровного толя или пергамина. Шевелин прошивают по длине крепкими кручеными нитями. Длина полотнища составляет 25 м, ширина 1 м, толщина 12,5 и 25 мм; полотнища связывают в рулоны. Средняя плотность шевелина 100—150 кг/м³, теплопроводность — около 0,05 Вт/(м·К). Используется этот простейший теплоизоляционный материал для утепления стен и перекрытий в облегченном деревянном строительстве.

13.5. ПОЛИМЕРНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Теплоизоляционные материалы, получаемые на основе органических полимеров, характеризуются значительной легкостью, малой теплопроводностью и достаточной механической прочностью. Особый интерес представляют «заливочные» пено- и лоропласты на основе фенолоформальдегидных, пенополистирольных, пенополивинилхлоридных и полиуретановых полимеров. Образование теплоизолирующей прослойки пено- или поропласта непосредственно при изготовлении стеновых панелей значительно упрощает и удешевляет производство работ.

Пенополистирол имеет пористую структуру с замкнутыми ячейками, заполненными воздухом или газом (азот и др.), Сырьем для изготовления пенополистирола служат суспензионный полистирол и порофор как вспенивающий компонент.

Эту разновидность пенопласта выпускают в виде плит, изготавливаемых беспрессовым способом, марок ПС-С (с антипиреном) и ПСБ (без него) или фасонных изделий марок ПС-1, ПС-4 и ПС-6. Пенополистирол характеризуется следующими показателями физико-механических свойств: средняя плотность плит находится в пределах 20—40 кг/м³, теплопроводность 0,035—0,4 Вт/(м·К), предел прочности при изгибе до 0,18 МПа, водопоглощение по объему — не более 2—5% за 24 ч. Пенополистирол не подвержен гниению, легко гвоздится и склеивается со многими строительными материалами. Он используется в конструкциях совмещенных кровель, в строительстве холодильников, при устройстве внутренних перегородок, междуэтажных перекрытий, вентиляционных каналов, утепления стен.

К весьма эффективному материалу относится экструзионный пенополистирол «Экспол», вспучивающийся через расплав в экструдере. Он характеризуется максимальной устойчивостью теплотехнических и физико-механических свойств во времени. Его структура отличается микропористостью при нулевой капиллярности, что обеспечивает низкое водопоглощение при гарантированной высокой прочности. Такое сочетание позитивных показателей свойств пенополистирола благоприятствует его высокой долговечности. Он применяется как утеплитель оснований автомобильных дорог и железнодорожного полотна, подземных частей зданий и сооружений, в конструкциях кровли, в зонах вечной мерзлоты и т. п.

Пенополивинилхлорид — жесткий, эластичный или полуэластичный пенопласт. Плиточный жесткий пенопласт ПХВ-1 — легкая газонаполненная пластмасса равномерного, замкнутопористого строения. Длина и ширина плит бывает 500 мм при толщине не менее 45 мм. Эти плиты устойчивы к действию кислот, щелочей, воды и могут быть использованы в интервале температур от —60 до +60°С. Средняя плотность ПХВ-1 70—130 кг/м³, предел прочности при сжатии (перпендикулярно плоскости плиты) 0,4—7 МПа, водопоглощение за 24 ч не более 0,3%, теплопроводность — 0,04 Вт/(м·К).

Тенополивинилхлорид широко применяют для термоизоляции холодильников, рефрижераторов, а также для звукоизоляционных целей наравне с пенополистиролом.

Пенополиуретаны — газонаполненные пенопласта, получающиеся на основе полиэфиров и диизоцианатов. Выпускают их в виде лит размером 500х500х50 мм. Такие пенопласты могут быть применены в интервале температур от —60 до +170°С. Пенополиуретаны имеют среднюю плотность 100—200 кг/м³, теплопроводность — 0,06 Вт/(м·К); предел прочности при сжатии от 0,55 до 2,2 МПа.

Жесткие пенополиуретаны можно обрабатывать на токарных станках, пилить, сверлить, гвоздить. Пенополиуретан применяют в качестве тепло- и звукоизоляционного материала, в виде скорлуп и сегментов; широко используют для изоляции трубопроводов горячего и холодного водоснабжения.

Плиты теплоизоляционные из пенопласта на основе резальных фенолоформальдегидных смол применяют в ограждающих конструкциях при температуре изолируемых поверхностей не более 130°С. Это труднообрабатываемые изделия, марки по средней плотности

50, 75, 100. Размеры плит: длина — от 600 до 3000, ширина — 500—1200, толщина — 50—150 мм. Предел прочности при изгибе — не менее 0,08—0,26 МПа (в зависимости от марки), теплопроводность — не более 0,038—0,043 Вт/(м·К), влажность при отгрузке плит всех марок — не более 20% по массе.

Изделия теплоизоляционные из пенопласта марок ФРП-1 и резопен применяют в виде цилиндров, полуцилиндров, сегментов и отводов. Они имеют среднюю плотность в сухом состоянии 65—100 кг/м³. Внутренний диаметр цилиндров 47—221 мм, номинальная толщина 30, 40, 50, 60 мм и длина 1000 и 1500 мм. Их применяют для теплоизоляции трубопроводов диаметром 45—219 мм. Полуцилиндры применяют для изоляции трубопроводов диаметром 45—273 мм, сегменты — диаметром 325—1020 мм.

Сотопласты — тепло- и звукоизоляционные материалы, получаемые путем горячего формования гофрированных листов бумаги, ткани или древесного шпона, предварительно пропитанных феноло-формальдегидным резольным полимером.

Физико-механические свойства сотопластов зависят в основном от формы и размеров сот и от природы материала, образующего стенки полостей. Благодаря невысокой стоимости и малой теплопроводности наиболее широкое применение в строительстве получили сотопласты с наполнителем из хлопчатобумажных тканей и бумаги. Для улучшения теплотехнических показателей материала ячейки-соты заполняют измельченным пенопластом или стекловатой. Сотопласты применяют чаще всего как промежуточный слой при изготовлении трехслойных высокопрочных панелей.

Мипора — легкий, тепло- и звукоизоляционный материал в виде затвердевшей пены белого цвета. Сырьем для мипоры служат мочевиноформальдегидные полимеры, 10%-ный раствор сульфонафтенных кислот и некоторые добавки.

Мипору выпускают блоками объемом от 0,005 до 0,100 м³ (при толщине 10 и 20 см) или в виде плиток и крошки.

Основные физико-механические свойства мипоры: средняя плотность 10—20 кг/м³, теплопроводность 0,03 Вт/(м·К). Крайне малая механическая прочность мипоры затрудняет ее непосредственное применение. Поэтому ее чаще всего используют как теплоизоляционный наполнитель и звукопоглощающий материал в каркасных конструкциях.

Глава 14 Акустические материалы и изделия

14.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Акустическими называются материалы, способные уменьшать энергию звуковой волны, снижать уровень громкости внутреннего или внешнего звука.

Звук — это восприятие ухом упругих механических колебаний и

волн, возникающих в среде под влиянием принудительных воздействий. Частоты колебаний, выражаемые в герцах (Гц), могут быть низкими, средними и высокими, что обусловлено числом колебаний в 1 с: при низкой частотности — 16—500 Гц, средние — 500—2000 Гц, высокие — 2000—15000 Гц и выше (1 Гц = 1 колебание в 1 с). Количество энергии, переносимой звуковой волной за 1 с через площадку площадью 1 см², перпендикулярную направлению движения волны, называют силой звука и выражают в ваттах на 1 см² (Вт/см²). Человеческое ухо воспринимает звук лишь при его силе не ниже некоторой минимальной величины, называемой порогом слышимости. Порог слышимости различен для низких, средних и высоких частот. Наиболее чувствительно человеческое ухо к колебаниям с частотами в области 1000—3000 Гц, когда порог слышимости достигает интенсивности звука до 10⁻¹⁶ Вт/см². Болевые ощущения в ухе возникают при пороге 10⁻² Вт/см², называемом болевым порогом, большим в 10¹⁴ раз по силе звука, чем при пороге слышимости. Последнюю силу звука принимают как нулевой уровень. За реальный уровень громкости полагают величину, пропорциональную логарифму отношения силы данного звука к силе звука на нулевом уровне, выражаемую в белах (Б) или децибелах (дБ). Например, шепот — 10, тихий разговор — 40, улица с нормальным движением — 60, а с шумным — 70, грузовой автомобиль — 90, авиационный мотор — 120 дБ, болевой порог — 140 дБ. Эти и другие данные учитывают при расчетах звукоизоляции по формулам.

Для большинства зданий задача акустики, акустического благоустройства заключается в снижении уровней внешних шумов до допустимого при относительном режиме тишины в помещениях производственных, учебных, жилых, культурно-бытовых и других зданий. Для зданий общественного назначения важно также обеспечить в основных помещениях хорошую слышимость и разборчивость, а в музыкальных помещениях — еще и естественность звучания инструментов и голоса. Эти задачи решаются комплексом конструктивных, планировочных и предупредительных мероприятий. Главным из них служит правильное назначение строительных материалов в конструкциях, особенно в ограждающих (стены, перегородки), междуэтажных перекрытиях и кровельных — покрытиях. Выбор материалов основан на их различной способности к задержанию (поглощению) звуковой волны, которая может распространяться как в воздухе, так и в твердых телах и жидкостях. Скорость звука в воздухе приблизительно равна 340, в воде — 1450 м/с, в твердых телах еще выше: в кирпичной кладке — 2000, бетоне — 4000, металле — свыше 5000 м/с. На пути воздушного переноса звука устанавливают преграды из звукопоглощающих материалов и конструкций. Сложнее преграды установить на пути материального I (ударного) переноса звука, например при устройстве междуэтажных перекрытий. Чаще всего воздушные и ударные переносы шумов совмещаются, особенно в современных зданиях, выполняемых из сборного железобетона, обладающего малым звукопоглощением, и имеющих щели, неплотности и отверстия, а при тонких конструкциях — способные еще и к изгибным колебаниям. С увеличением массы ограждения улучшается поглощение звука, так как массивное ограждение труднее перевести в изгибное колебание под влиянием волнового звукового давления. Но с увеличением массы ограждения прирост звуковой изоляции происходит медленно. Так, например, если при массе перегородки 100 кг звукоизоляция составляет 40 дБ, то при массе 200 кг — 44 дБ, при 300 кг — 48 дБ. Для дальнейшего снижения шума потребуются устраивать либо очень тяжелые однородные ограждения, либо заменить их ограждениями

из двух стенок со сплошными воздушными прослойками (без жестких связей между стенками), переходить к слоистым конструкциям и т. п.

Для борьбы с шумом и переносом звука используют звукопоглощающие (активно поглощающие звук) и звукоизоляционные (снижающие уровень шума) материалы. Ниже рассмотрены основные разновидности этих материалов. Они могут быть отделочными и прокладочными.

Отделочные материалы частично поглощают звук внутри помещений, например промышленных цехов, машинописного бюро и пр., или технических устройств, например вентиляционных воздуховодов и др. Отделочные звукопоглощающие материалы также оптимизируют условия слышимости в помещениях, например, в зрительных залах, лекционных аудиториях, радиовещательных студиях и т. п. Большая или меньшая часть звуковых волн обычно отражается от конструкций, выполненных из отделочных звукопоглощающих материалов. В результате в помещении сохраняется звучание даже после прекращения действия источника звука. Такое явление называется реверберацией.

Прокладочные материалы используют под упругими полами междуэтажных перекрытий, предохраняя тем самым помещения от распространения материального (ударного) переноса звука. Нередко эти материалы комбинируют с отделочными.

Числовую величину поглощения звука оценивают коэффициентом, который показывает долю энергии звуковой волны, поглощаемой 1 м² поверхности материала в открытом проеме. Чем больше величина коэффициента звукопоглощения, тем выше соответствующая эффективность строительного материала в конструкции. При этом учитывают также частотность звучания, от которой существенно зависит величина коэффициента звукопоглощения.

14.2. ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Звукопоглощающие материалы разделяют по разным признакам: характеру поглощения звука, виду и технологии изготовления, характеру поверхности изделий. Все эти материалы обычно являются также отделочными, поскольку способствуют созданию внешней архитектурной выразительности помещений.

По характеру поглощения звука материалы разделяют на пористые, мембранные и перфорированные. Наиболее распространенными являются пористые. Звуковая энергия поглощается в этих материалах в основном за счет трения частиц воздуха в порах и капиллярах, весьма развитых и различных по диаметру. С повышением пористости увеличивается звукопоглощение, хотя имеется некоторый предел пористости (около 80%), выше которого звукопоглощение не возрастает и даже имеется тенденция к его снижению. Важен также размер диаметра пор. При малых размерах пор проникновение звуковой энергии в толщу материала затруднено, а звукопоглощение оказывается незначительным. Оптимальным может быть принят диаметр пор до 1 мм. При мембранном типе материала сила звука снижается вследствие затраты энергии на вынужденное колебание достаточно массивных и жестких мембран (плиты, фанерные листы, плотный картон, некоторые ткани и др.). Перфорированные панели и другие материалы имеют отверстия, в которых задерживается воздух, создающий тормоз на пути воздушного переноса звука, что создает лучший эффект звукопоглощения.

С звукопоглощающим материалам, отличающимся между собой внешним видом и технологией изготовления, относятся плитные, рулонные и комбинированные. По характеру поверхности изделий эти материалы разделяются на плиты с естественной фактурой, с порами и раковинами, с рифленой поверхностью, с перфорированной поверхностью, т. е. с отверстиями одного или разного диаметра, расположенными симметрично или бессистемно.

Независимо от разновидностей звукопоглощающего материала они имеют, некоторые общие признаки. Их коэффициент звукопоглощения не должен снижаться ниже 0,20 при низких частотах звука и ниже 0,40 при средних частотах. Они должны быть достаточно огнестойкими, противостоять гниению и не должны выщелачивать химических веществ и неприятного запаха. Их средняя плотность не должна быть выше 300—400 кг/м³. Немаловажное значение имеют декоративные свойства и цвет звукопоглощающих материалов, поскольку они, как правило, служат и для архитектурной отделки помещений (чем, кстати, существенно отличаются от других пористых материалов — теплоизоляционных). Эти материалы при выполнении своей основной функции — поглощение звука — реагируют на частотность его колебания. С увеличением частотности звукопоглощение пористым материалом увеличивается, а при низких частотах повышенный эффект приносят сплошные воздушные прослойки (зазоры) размером 7—10 см между стенками.

К сравнительно эффективным относятся акустические плиты на основе синтетических связующих и с применением в них волокнистых заполнителей — стеклянной и минеральной ваты. Эти плиты имеют габариты 500x500x20 мм и среднюю плотность до 140 кг/м³. Они покрыты сверху декоративным покровным слоем и обладают хорошими декоративными качествами. Их используют для облицовки потолков, вестибюлей, залов театров, концертных залов, радиостудий и помещений с большим шумовыделением. Коэффициент звукопоглощения в интервале частот от 500 до 2000 Гц составляет 0,40—0,47, а предел прочности при разрыве — 0,3—0,4 МПа.

Другой разновидностью акустических изделий служат: плиты из легких бетонов на основе неорганических вяжущих и с применением пемзы, керамзита, вспученного перлита или вермикулита и др.; плиты из фибролита средней плотности до 300 кг/м³ особенно при ширине стружки 2—3 мм; древесноволокнистые плиты двухслойные перфорированные при воздушном зазоре в конструкции 5 см и более; гипсовые плиты (перфорированные и

сплошные), армированные стекложгутом или поливинилхлоридным шнуром; древесностружечные плиты, изготовленные из мелкой стружки на основе синтетических смол, и некоторые другие. Практическую пользу приносят акустические звукопоглощающие штукатурки (в 3—4 слоя) на основе белого портландцемента и с заполнителями в виде обожженной каолиновой крошки с размером зерен 1—3 мм, или тонкогранулированной минеральной ваты с гранулами 2—3 мм, или перлитового песка с размером зерен до 5 мм и насыпной плотностью 80—200 кг/м³. Эффективно выполняют функции звукопоглощения конструкции из пористых волокнистых материалов, покрытых различными тонкими перфорированными листами и сетками. Перфорация в плитах и листах может быть сквозной и несквозной в зависимости от типа и назначения конструкций.

Широкой гаммой цветов обладают плиты «Силапор», что вносит разнообразие в интерьеры помещений. Эти плиты изготавливают из легковесного ячеистого бетона (газо- и пенобетона) специальной структуры. Они могут быть с продольной щелевой перфорацией и без перфорации. Их средняя плотность 300—500 кг/м³, а коэффициент звукопоглощения в диапазоне 200—400 Гц составляет от 0,3 до 0,8. Хорошими эксплуатационными и архитектурными свойствами обладают плиты из газосиликата размером 750х350х25 мм. При их изготовлении компоненты (известь, песок, вода и красители) смешивают, раствор заливают в формы, изделия запаривают в автоклавах, после чего их фрезеруют и калибруют. Следует отметить, что эффективность звукопоглощающих материалов становится высокой, если коэффициент звукопоглощения больше 0,6, и средней, если этот коэффициент находится в пределах 0,4—0,6.

Высокой эффективностью отличаются акустические плиты «Акмигран» и «Акминит» средней плотностью 350—400 кг/м³, а также гипсовые перфорированные плиты (с несквозной перфорацией) для подвесных потолков.

Плиты «Акмигран» изготавливают из минеральной или стеклянной ваты (гранулированной) на связке из смеси крахмала, бентонита и карбоксилметилцеллюлозы. После формования и сушки поверхности плит отделяют.

Плиты «Акминит» имеют тот же состав, что и плиты «Акмигран», но вместо бентонита используют каолин, литопон (смесь сернокислого бария и сернокислого цинка как пигментирующая добавка) и поливинилацетатную эмульсию. Плиты изготавливают методом отливки смеси в формы, в которой имеются гранулированная минеральная вата и раствор крахмального связующего. Формы высушивают в сочетании с вакуумированием, механически обрабатывают и окрашивают.

Плиты «Акмигран» и «Акминит» имеют коэффициент звукопоглощения от 0,4 до 0,8 в интервале 200—2000 Гц. Перфорация плит увеличивает звукопоглощаемость на 10—20% при частотах 200—1000 Гц. Следует отметить, что применение плит «Акмигран» и «Акминит» возможно только при влажности до 70%, иначе крахмальное связующее набухает. Полимерные добавки повышают водостойчивость, но не делают его водостойким. Увлажнение этих материалов снижает показатели звукопоглощающих свойств. Габариты плит — 300х300х20 мм. Лицевая (окрашенная) сторона плит имеет фактуру, т. е. отделку в виде неправильных трещин или каверн, которые имитируют поверхность выветрившегося известняка. Плиты крепят с помощью металлических профилей или специальной мастики.

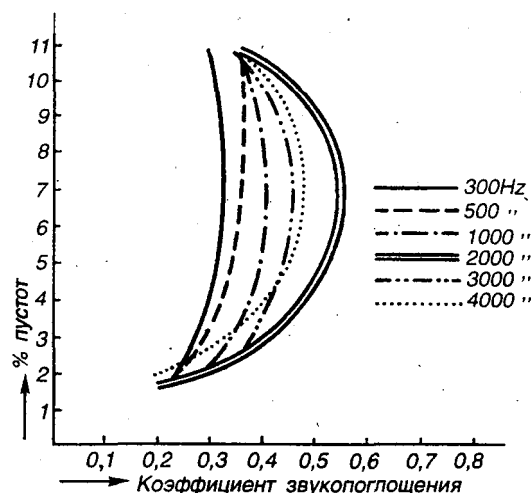


Рис. 14.1. График звукопоглощающей способности асфальтобетона

Большой звукопоглощающей способностью обладают асбестоцементные акустические экраны, перфорированные круглыми или щелевыми сквозными отверстиями, для подвесных потолков или

стен в шумных помещениях. Они обладают высокой механической прочностью, огнестойкостью, долговечностью, гигиеничностью, экономичностью.

При особой форме пустот в виде резонаторов (полостей с узкой горловиной) роль звукопоглощающего и вместе с тем конструктивного материала может выполнять пустотелый глиняный кирпич, коэффициент звукопоглощения которого может составлять до 0,8. Из других материалов следует отметить хорошие звукопоглощающие свойства асфальтобетона (рис. 14.1), особенно с пористой структурой, что важно учитывать при борьбе с городским шумом, в цехах заводов и т. п.

14.3. ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Звукоизоляционные материалы применяют для изоляции помещений от распространения материального (ударного) переноса звука. В отличие от звукопоглощающих эти материалы остаются практически в скрытом от взора состоянии в виде прокладочных слоев в конструкциях внутренних стен (перегородок) и междуэтажных перекрытий зданий. Они располагаются между наружными оболочками (панелей, щитов и др.), находясь в свободном (не сжатом) или даже подвешенном состоянии (например, подвешенные маты). Возможно и некоторое обжатие звукоизолирующей прослойки, например, между несущими панелями потолка и конструкцией пола на упругом основании.

Звукоизоляция всегда связана с характером конструкции, а не только со структурой и свойством материала, как при звукопоглощении. Она не остается постоянной при изменении структуры конструкции, ее размера и массы, жесткости связей в конструкции, характера контакта и опирания элементов конструкции и т. п. Если конструкции однородные, например в виде сплошной плиты, способной под влиянием звукового давления и колебаний звука совершать колебательные движения всей своей массой, то, как отмечалось выше, звуковая изоляция возрастает с увеличением массы однородной конструкции. Это возрастание происходит медленно, пропорционально десятичному логарифму ее массы. Если конструкции неоднородны, состоят из двух или большего числа оболочек, с инородными прослойками между ними, то колебания каждой оболочки под влиянием звуковой волны отличаются и они постепенно «гасятся» в конструкции. Гашению звука и шума способствуют прослойки из инородного материала в виде зернистых засыпок, волокнистых и пористых плит или в виде воздушных сплошных прослоек. Важно также, чтобы отсутствовали жесткие связи между стенками, разделенными прослойками, так как они тогда колеблются как одно целое и эффекта гашения звука не произойдет. Именно поэтому применение ограждений из плит или блоков с обычными пустотами (а не в форме резонатора) не увеличивает звукоизоляции, которая как и в других жестких конструкциях, определяется только массой ограждения. Хороший эффект звукоизоляции дают слоистые конструкции, формируемые из нескольких слоев различных материалов, значительно отличающихся между собой плотностью и жесткостью. Важной характеристикой качества прокладочного материала является его жесткость, которая, во-первых, призвана компенсировать отсутствие жестких связей между стенками в неоднородных конструкциях, а во-вторых, больше погасить ударных звуковых колебаний. Но и жесткость, определяемая динамическим модулем упругости, не должна быть чрезмерно высокой, так как чем ниже динамический модуль упругости, тем больше ударных шумов поглощает прокладочный материал. По величине модуля упругости различают три класса звукоизоляционных материалов: I — до 1 МПа, II — от 1 до 5 МПа и III — от 5 до 15 МПа.

Другой характеристикой звукоизоляционного материала является деформативность — способность материала сжиматься под определенной нагрузкой, обычно принимаемой в 1 МПа. По этой характеристике материалы могут быть разделены на мягкие, когда относительная деформация более 15%, полужесткие, если она в пределах 5—15%, и жесткие — менее 5%. Еще меньше деформативность у твердых материалов — от 0 до 5%. Общая оценка звукоизолирующей способности конструкции производится путем вычисления ее значения $R = 10 \lg(1/\tau)$, где τ — коэффициент проницаемости (отношение звуковой мощности, прошедшей через ограждение, к звуковой мощности, приходящейся на это ограждение).

Звукоизоляционными акустическими материалами служат полужесткие минераловатные и стекловатные маты и плиты на синтетической связке, древесноволокнистые изоляционные и асбестоцементные изоляционные плиты (последние используют в местах опирания конструктивных элементов перекрытий на стены зданий). Для звукоизоляции используют

также плиты из полистирольного пенопласта, а из засыпных материалов — кварцевый песок, керамзит, шлак. В целом следует учитывать, что звукоизоляция помещений достигается не только в результате устройства ограждающих конструкций, но и комплексом мероприятий, например планировочного характера с правильным размещением оборудования или по тщательной заделке швов и неплотностей.

Глава 15 Гидроизоляционные материалы и изделия

15.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Гидроизоляционные, в том числе кровельные и герметизирующие материалы и изделия предназначены для изоляции строительных конструкций зданий и сооружений от воздействия агрессивной внешней среды, особенно воды и влажного воздуха. Поэтому материалы этой группы строительных материалов должны быть водонепроницаемыми и удовлетворять показателю прочности, деформативности, химической стойкости, водостойкости и долговечности. Их используют при наружной и внутренней защите подземных сооружений — котлованов, фундаментов, труб под насыпями и трубопроводов, коллекторов, туннелей, сводов траншей и т. п. — от воздействия грунтовых вод с растворенными в них, как правило, агрессивными солями, кислотами и щелочами, а также других химических реагентов для изоляции водохранилищ, бассейнов, водоемов и пр.; для защиты мостов (конструкций проезжей части, опор и др.); при устройстве противofiltrационных экранов и укрепительных покрытий в гидротехническом строительстве; для изоляции дна и откосов каналов в ирригационном строительстве; для заполнения полостей в горных породах при устройстве оснований и фундаментов; при защите междуэтажных перекрытий в производственных помещениях и санузлах; при устройстве кровли и кровельных покрытий зданий: для герметизации стыков, температурных швов, отверстий в крупнопанельном строительстве и при прокладке труб. Гидроизоляция не только предохраняет защищаемую поверхность от контакта с водной средой, но и благоприятствует паро- и газоизоляции, повышению стойкости конструкционного материала против коррозии.

По виду применяемого связующего вещества кровельные и гидроизоляционные материалы подразделяют на битумные, дегтевые, битумно-дегтевые, битумно-полимерные, полимерные и другие органические водонерастворимые вещества. Имеется также группа гидроизоляционных материалов, которые гидрофильны, частично водорастворимы, химически реагируют в воде и относятся к неорганическим, силикатным, получаемым на основе напрягающего и расширяющегося цемента. Для этих целей можно использовать также и портландцемент с соответствующими добавками. Получают сухие смеси типа «Гидротекс» отечественные или аналоги их за рубежом. Поэтому наиболее полной является комбинированная классификация этих материалов, в которой различные признаки учитываются в их совокупности (рис. 15.1). В ней по физическому виду и состоянию в период применения они разделены на жидкие, пластично-вязкие, упруговязкие и твердые. Жидкие в свою очередь разделяются на пропиточные, инъекционные, пленкообразующие и грунтовочные, применяемые в горячем, теплом или холодном состояниях. Пластично-вязкие материалы разделяются на обмазочные, обмазочно-уплотняемые, приклеивающие или оклеечные, затирочные и шпаклевочные, используемые также в горячем, теплом и холодном состояниях, причем обмазочные материалы в свою очередь можно подразделять на мастики и пасты, обмазочно-уплотняемые — на строительные растворы и бетоны с использованием НЦ, РЦ и сухих смесей, приклеивающие — на клеевые мастики и клеи. Упруго-вязкие и твердые материалы разделяются на рулонные и пленочные, штучные и насыпные (или рыхлые), причем в группе рулонных различают безосновные и основные; в основных имеется ряд рулонных материалов, применяемых с подогревом и без подогрева поверхностного слоя. Ниже рассмотрен ряд основных гидроизоляционных, кровельных и герметизирующих материалов и изделий.



Рис. 15.1. Комбинированная классификация гидроизоляционных материалов

15.2. ЖИДКИЕ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Пропиточные жидкие вещества способны легко смачивать конструкцию или отдельные ее элементы, изделия и детали, заполняя поры и различные дефекты, проникать на необходимую глубину. Слой пропиточного вещества надежно предохраняет конструкцию от проникновения воды.

В качестве пропиточных веществ применяют битумы, каменноугольные дегти, пеки, петролатум, стирол, метилметакрилат, низкомолекулярный полиэтилен и др. Конструкции, элементы и строительные изделия (сваи, плиты, балки, листы и трубы и др.), пропитанные этими органическими веществами, имеют высокую водонепроницаемость, повышенные морозо- и водостойчивость и коррозионную стойкость. В настоящее время среди пропиточных веществ наиболее распространен битум, который употребляют в холодном или нагретом состоянии (разжиженный или жидкий битум), а также в виде битумной эмульсии; для горячей пропитки применяют вязкие битумы. Битумные эмульсии нередко модифицируют полимерами, каучуками, латексами, но с обязательным применением анионных или катионных эмульгаторов. Содержание битума в эмульсиях не менее 50%, а водорастворимых эмульгаторов — не более 1—3%. Для изоляционных работ способом пропитки вязкость эмульсии должна быть не более 25 с по стандартному вискозиметру при температуре 20°C.

Хорошие результаты дает пропитка кремнийорганическими гидрофобизирующими жидкостями. Их проникающая способность превышает это свойство у других пропиточных веществ — битума, битумной эмульсии, эпоксидной смолы и др. Промышленностью выпускаются полиорганосилоксанаты щелочных металлов марок ГКЖ-10, ГКЖ-11, а также полиорганогидроксилоксановые жидкости марок ГКЖ-94 и ГКЖ-94М. В пропитке строительных изделий с использованием нагревания практическое применение имеет стирол-мономер. Вследствие своей невысокой вязкости он легко проникает в бетон, а находясь в порах, полимеризуется после кратковременного прогревания при температуре 60—80°C, особенно с изолируемой стороны объекта. Интенсивнее протекает пропитка мономера с внутренним вакуумированием по сравнению со способами пропитки в открытых ваннах и автоклавным.

Инъекционные вещества — материалы, которые достаточно интенсивно проникают внутрь конструкционного элемента под давлением (впрыскивание), заполняя поры, капилляры и другие полости. Принудительное нагнетание гидроизоляционного вещества обеспечивает более высокую водонепроницаемость защитного слоя, чем свободная пропитка. При этом способе можно использовать более вязкие гидроизоляционные вещества — битумные расплавы и эмульсии с условной вязкостью до 40 с, битум вязкий, битумно-латексный компаунд, а также эпоксидные, карбамидные, фенолоформальдегидные смолы. Битумно-резиновые дисперсии с содержанием нефтебитума (35%), резины (15%) и водного раствора эмульгатора (50%) по качеству превосходят битумные эмульсии, так как более устойчивы против распада. Вязкий битум применяют в горячем состоянии. Он хорошо впитывается в горные породы, бетоны, грунты. Эффективным полимерным инъекционным материалом является поливинилацетатная водная эмульсия. Эту эмульсию пластифицируют путем введения в нее водной эмульсии дибутилфталата и тщательного смешения обеих эмульсий. Высокоэффективны инъекции кремнийорганических веществ, карбамидной смолы в смеси с раствором соляной кислоты и др.

Пленкообразующие материалы после нанесения на поверхность конструкционного элемента образуют тонкий слой в виде прочной водонепроницаемой пленки. Образование пленки связано либо с улетучиванием растворителя, либо с окислением и полимеризацией под влиянием сиккативов. Пленка предохраняет защищаемую конструкцию от контакта с водной средой и проникания воды в материал. С помощью пленки предохраняют преимущественно наружные поверхности конструкций или элементов сооружения,

поэтому ей стремятся придать не только гидрофобные, но и антикоррозионные свойства, высокую погодоустойчивость, трещиностойкость; окраска — белая, черная или цветная. Пленкообразующие вещества используют и как эффективное средство для создания оптимальных овий твердения свежесуложенного бетона без смачивания поверхности водой. Наносят пленкообразующие материалы с помощью поливочных машин, пистолетов-распылителей, электрокраскопульты и другого механического оборудования.

Наибольшее применение получили разжиженные битумы и битумные эмульсии, вязкие битумы (при горячем способе нанесения пленки), лаки и эмали. При многослойном нанесении пленок концентрация растворов постепенно возрастает. Из лаков чаще используют битумный или асфальтовый — растворы битума в ксилоле, сольвент-нафте, уайт-спирите и других эффективных растворителях. В сложных составах битум перед растворением сплавляют с натуральной или синтетической смолой, минеральным маслом или смесью смол и масел. Эти вещества, добавляемые к битуму, повышают качество лаковой основы как пленкообразующей части лака, их атмосфере- и водостойкость, способствуют уплотнению пленки. Примерный состав сложных асфальтовых лаков, %: смола — до 20, битум — до 45, растворитель до 35. Применяют и безмасляные асфальтовые лаки, состоящие из сплава природного тугоплавкового битума, например садкинского асфальтита, с природной смолой (например, канифолью) и растворителя. Простейший вид дегтевого лака — кузбасс-лак. Его получают растворением каменноугольного пека в ароматических растворителях — толуоле, сольвент-нафте (смеси ксилолов). Кузбасс-лак сорта А полностью высыхает через 24 ч, для сорта Б время высыхания не нормируется. Битумные и дегтевые лаки используют для защиты металлических и бетонных изделий и конструкций.

Среди лаков с основой из синтетических смол чаще других применяют перхлорвиниловые. Их изготавливают на перхлорвиниловой смоле; растворителем в них служат ксилол, хлорбензол, бутилацетат и др., а иногда их смеси (растворитель Р-4). Пленка перхлорвиниловых лаков стойко сопротивляется атмосферным воздействиям и не гигроскопична. Лаки изготавливают и на основе кремнийорганических полимеров с получением метилтрихлорсиланового лака, обладающего водоотталкивающими свойствами. Им обрабатывают пористые материалы, подвергающиеся увлажнению. При этом на стенках пор возникает гидрофобная и воздухопроницаемая пленка, что надежно предохраняет кирпичную или каменную кладку, бетонную стенку и другие конструкции сооружения от сырости, вымывания солей и появления «высолов» и пятен в течение длительного (более 10 лет) времени. Покрытие 5%-ным раствором метилтрихлор-силана в бензине придает гипсовому камню и другим недостаточно водостойким материалам водоотталкивающую способность и увеличивает их долговечность в конструкциях. Этим пленкообразующим веществом были обработаны, например, стены Русского музея, Мраморного дворца в Санкт-Петербурге и другие исторические памятники.

Основным пленкообразующим компонентом лаков на основе эпоксидных смол служит эпоксиднодиановая смола марок ЭД-16 и ЭД-20. На основе хлорсульфинированного полиэтилена вырабатывают лак ХСПЭ, в который добавляют также ксилол или толуол и стабилизатор.

К пленкообразующим веществам относятся также эмали, получаемые путем затворения пигментов на лаках. Так, при действии на конструкцию солнечных лучей целесообразно пользоваться эмалью на основе битумного лака с добавлением в него алюминиевого порошка. Эта эмаль дает светло-серебристое покрытие. К водостойким относятся перхлорвиниловая эмаль марок ХС-26, а также ПХВ-23, изготавливаемые смешением одноименной смолы, растворителя Р-4 и пигмента, затворенного с пластификатором (трикрезил-фосфатом). Для гидроизоляции конструкций из железобетона и асбестоцемента, находящихся в условиях постоянной сырости при положительных и отрицательных температурах, пригодны эпоксидно-каучуковые эмали. В них пластификатором является жидкий карбоксилатный каучук, пигментом — железный

сурик или алюминиевая пудра, отвердителем — полиэтиленполиамин. Наиболее водостойкой является эмаль ЭКК-25, наиболее эластичной — ЭКК-200.

Кроме вышеупомянутых применяют этиоловые эмали. Некоторые черные эмали получают на основе мочевиноформальдегидной и меламиноформальдегидной смол. Они представляют собой суспензии, в которых сажа выступает дисперсной фазой; кроме того в них добавлены алкидная смола и растворитель.

Грунтовочные материалы распределяют по поверхности защищаемой конструкции тончайшим слоем с целью повышения сцепления между основанием и пленкообразующим материалом, увеличения олеофильности поверхности перед нанесением на нее шпаклевочного слоя, гидроизоляции или декоративного покрытия.

Грунтовочные материалы (грунтовки) непосредственно предохраняют металлические изделия, конструкции и части сооружения от влаги, атмосферных воздействий и коррозии.

Их наносят на бетон, кирпичную кладку. При использовании пропиточных или инъекционных веществ обычно не требуется применять грунтовочный материал. В качестве грунтовок используют грунтовку под пековую паро- и гидроизоляцию. Она представляет собой соответствующую фракцию коксового дегтя. Их роль с успехом выполняют также масляные краски на натуральной олифе и с атмосферостойкими пигментами — алюминиевым порошком, свинцовым суриком, свинцовой зеленью или цинковым кроном. Натуральную олифу заменяют полунатуральной — оксолью или оксоль-смесью, а также глифталевым или пентафталевым лаками. В качестве грунтовочных материалов используют также этиоловые краски, эпоксидные и эпоксидно-каучуковые грунтовки (ЭКГ). Последние получают смешением эпоксидной смолы ЭД-16, каучука жидкого СКН-10-1А, растворителя 646 и отвердителя в краскосмесителе при соотношении масс 10:1:11:1.

15.3. ПЛАСТИЧНО-ВЯЗКИЕ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Поверхностная обработка защищаемой конструкции пленкообразующими веществами производится не только по оштукатуренному слою, но и после нанесения выравнивающих слоев. Для них используют пластично-вязкие вещества. Они имеют, как правило, коагуляционную структуру. Этим предопределяются их сравнительно низкие механические и ярко выраженные тиксотропные свойства. Применяют их в холодном, теплом и горячем состояниях. К материалам этой группы относятся обмазочные и приклеивающие мастики и пасты, а также вспомогательные — затирочные и шпаклевочные.

К обмазочным относятся пасты и мастики.

Пасты бывают битумные и дегтевые, имеют густую сметанообразную консистенцию. Получают путем диспергирования битума или дегтя в воде в присутствии твердого эмульгатора — глины или извести (55—50% на массу сухого вещества). Качество пасты характеризуют однородностью, вязкостью и устойчивостью в воде. Для повышения механической прочности в пасту добавляют минеральный порошок, а для усиления стойкости пленки в сырых условиях эксплуатации конструкции в нее вносят и портландцемент.

Пасты применяют для обмазки изделий из древесины, нанесения слоя гидроизоляции на конструкции, подвергающиеся кратковременному воздействию воды. При длительном контакте с водой может происходить реэмульгирование битума; деготь практически не реэмульгирует. Пасту можно использовать и для приготовления мастик.

Мастики — пластичные материалы, получаемые смешением (рис. 15.2) органических вяжущих веществ с минеральными наполнителями и добавками (пластифицирующими, упрочняющими и др.). Их разделяют на битумные, битумно-полимерные, битумно-резиновые, дегтевые, дегте-полимерные, гудрокамовые и гудрокам-полимерные, а на основе полимеров — эпоксидные, фурановые, каучукоподобные олигомеры и др. Употребляют с подогревом и без подогрева; температуры обусловлены видом вяжущего вещества и составом мастики. В качестве минеральных наполнителей мастик применяют волокнистые и пылевидные: хризотиласбест 6-го или 7-го сортов, молотый известняк, тальк, трепел, золу-унос и др. Частицы волокнистого наполнителя проходят полностью через сито № 04, а пылевидного — через сито № 02 при остатке на сите № 009 — не более 10% по массе. Все они способствуют повышению теплостойкости мастик, снижают хрупкость при пониженных температурах и повышают их прочность. Мастики могут быть и без наполнителя в виде вяжущего вещества, раствора или сплава.

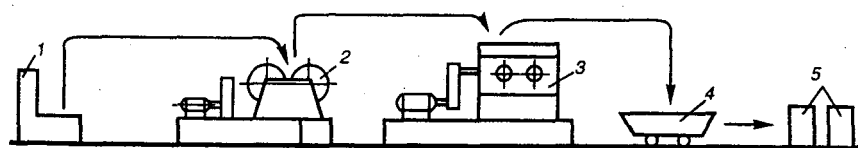


Рис. 15.2. Схема производства битумокаучуковых мастик:
1 — дозатор; 2 — вальцы; 3 — запасной смеситель; 4 — вагонетка; 5 — бочки картонные

Из горячих мастик широко распространены кровельные битумные, применяемые для гидроизоляции в конструкциях, не подверженных прямым атмосферным воздействиям (табл. 15.1).

Таблица 15.1. Технические характеристики горячих кровельно-гидроизоляционных мастик

Марка мастики	Содержание наполнителя, % по массе	Температура размягчения по КиШ, °С	Температура хрупкости битумного вяжущего,
---------------	------------------------------------	------------------------------------	---

	пылевидного	волокнистого	битумного вяжущего	мастики	°С
МБК-Г-55	25	—	45	55—60	Не менее -18
	—	10—12	50	—	
	—	12—15	55	—	
МБК-Г-65	25	—	60	68—72	-15
	—	15—20	60	—	
МБК-Г-75	—	15—20	65—70	77—80	-13
МБК-Г-80	—	20—25	70—75	87—92	-12
МБК-Г-100	—	20—25	85—90	105—110	-10

Примечание: цифры в марках (55, 65 и другие) — теплостойкость мастик.

Мастики образуют на поверхности конструкций гидроизоляционный слой, а также заполняют трещины, щели, мелкие отверстия в сооружениях; они служат для заделки скважин и устройства проти-вофильтрационных завес, обмазочной пароизоляции и изоляции фундаментов. Перед употреблением мастику разогревают до 160—180°С, в зимнее время — до 200°С. Добавки олеиновой кислоты, нафтената меди или алюминия повышают антикоррозионные свойства и биостойкость мастик. Улучшенные свойства — у битумно-резиновых мастик.

Холодную битумную мастику выпускают трех марок: МБС-Х-70, МБС-Х-85 и МБС-Х-100. В ее состав входят компаунд битумов БНК 45/180 и БНК 90/30, растворитель (лигроин, уайт-спирит, зеленое масло и др.) и наполнитель (асбест 7-го сорта или пылевидный). Имеются и другие разновидности холодных мастик — резинобитумные, гудрокамовые, полимербитумные (битурэл) и др., используемые для склеивания кровельных материалов и приклеивания их к основанию при устройстве многослойной кровли. Применение холодных мастик удлиняет строительный сезон и улучшает условия труда. Но имеется и недостаток: необходимость многократного прикатывания рулонного ковра для устранения вздутий на его поверхности.

Среди мастик следует особо отметить кровлелит и гидробутил. Первая получается смешением хлорсульфополиэтилена (в виде раствора в толуоле) и наполнителя — мела или резиновой крошки, растворителя и вулканизующего компонента (триэтанолamina). Ее выпускают двух видов: кровельную (МКВК) и гидроизоляционную (МКВГ). Кровельную мастику кровлелит применяют для устройства безрулонных кровель по бетонному основанию, а гидроизоляционную — для гидроизоляции стыков различных сооружений и конструкций. Мастика гидробутил — новый материал, получаемый с использованием полимеров типа бутилкаучуков. Характеризуется высоким относительным удлинением (до 500%), пределом прочности при растяжении до 0,35 МПа, высокой стойкостью к действию кислот и щелочей. Эту мастику используют главным образом для устройства гидроизоляции. Битурэл применяют для устройства новой кровли и ремонта старых кровель всех типов, для гидроизоляции подземных сооружений.

Мастики обычно транспортируют на место работ в холодном состоянии в закрытой таре, хорошо предохраняющей ее от воздействия влаги и солнечной радиации. На малые расстояния горячие мастики перевозят в гудронаторах, т. е. в специально оборудованных автомашинах. Мастики всех видов хранят на складах в специальной упаковке.

Из этих гидроизоляционных и кровельных материалов следует выделить герметизирующие материалы (герметики). Их изготовляют для заделки температурных швов, стыков стеновых панелей и швов, образующихся при монтаже сборных элементов конструкций. Они должны быть влаго- и газонепроницаемыми, тепло- и морозостойкими, надежно сохранять первоначальные свойства во времени.

К пластично-вязким герметикам на органической (битумной) основе относятся резинобитумная мастика «Изол Г-М» и уплотняющие мастики марок УМ-50, УМ-60

(буквы в марках мастик указывают на разновидность мастики «Уплотняющая мастика», а цифры соответствуют минимальной температуре их использования при °С).

Мастику «Изол Г-М» готовят путем смешения резинобитумного вяжущего, полиизобутилена, асбеста 7-го сорта, антисептика и других добавок. Ее применяют как в горячем (до 100°С), так и в холодном состоянии.

Уплотняющая мастика (УМ) представляет собой гидрофобную смесь полиизобутилена, наполнителя и раствора девулканизированной старой резины. Эта мастика обладает большим относительным удлинением, весьма малым водопоглощением, абсолютной воздухопроницаемостью и высокой адгезией к бетону, металлу и другим материалам.

Введение мастик УМ и «Изол Г-М» в стыки швов производится обычно с помощью шприцев.

Наряду с вязкопластичными материалами используют и эластичные прокладки, пористые или монолитные жгуты заданной конфигурации и размеров.

Из пористых эластичных прокладок часто применяют пороизол и гернит. Пороизол — гнилостойкий долговечный материал — получают путем вулканизации газонаполненной резины, модифицированной нефтяными дистиллятами. Хорошо перемешанную массу из указанных компонентов формируют в жгуты или ленты на ленточном прессе и подвергают вулканизации при температуре 150—160°С. Пороизол выпускают в виде прямоугольных полос размером 20х40 и 30х40 мм или жгутов диаметром 10—60 мм. Он производится двух марок: М — с незакрытыми порами и водопоглощением 5% и П — с защитным покрытием из озоностойкой пленки и водопоглощением 1%. При укладке в стык пороизола марки М необходимо закрыть поры на поверхности материала мастикой «Изол». Пороизол марки П перед применением не требует никакой предварительной обработки.

Для того чтобы пороизол проявил герметизирующие свойства, его предварительно обжимают на 15—50% от первоначального объема и в обжатом состоянии устанавливают в заделываемый шов. Заделка шва пороизолом часто производится с помощью приклеивающей мастики.

Пороизол не теряет эластичности в широком интервале температур (от -80 до +50°С), поэтому его применяют для герметизации горизонтальных и вертикальных стыков панелей наружных стен зданий в различных климатических зонах.

Гернит — пористый, эластичный материал — представляет собой герметизирующую прокладку с газо- и водонепроницаемой пленкой на поверхности. Этот герметик изготавливают на основе негорючего полихлорпренового каучука (наирита) в виде прокладок длиной до 3 м и диаметром 20, 40, 60 мм. Он отличается высокой степенью эластичности и сохраняет свои технические свойства при использовании в интервале температур от -40 до +70°С. Промышленность выпускает не только пористый гернит (П), но и плотный (С), с повышенной прочностью при разрыве и эластичностью при отрицательных температурах. Герметизация стыков между стеновыми панелями с помощью гернита производится при условии обжатия прокладки в стыке до 30—40% от первоначального объема герметика. Этот материал обладает долговечностью и примерно одинаковыми свойствами с пороизолом при несколько большем относительном удлинении.

Гернит П применяют при герметизации стыков в крупнопанельном домостроении и строительстве тоннелей метро.

15.4. УПРУГО-ВЯЗКИЕ И ТВЕРДЫЕ КРОВЕЛЬНЫЕ И ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

В группе гидроизоляционных и кровельных материалов широко представлены рулонные — основные и безосновные, покровные и беспокровные материалы, листовые и штучные изделия.

Рубероид — кровельный и гидроизоляционный материал, получаемый путем пропитки кровельного картона мягким нефтяным битумом с последующим покрытием с одной или двух сторон тугоплавким битумом.

Для улучшения качества рубероида в битум покровного слоя иногда вводят наполнитель в виде тонкодисперсного порошка (известняк, доломит, тальк и др.). С целью повышения атмосферостойкости рубероида, предотвращения слипания рулона и придания поверхности декоративного внешнего вида на лицевую поверхность наносят минеральную посыпку. В качестве посыпки используют измельченные минеральные материалы: слюду, тальк, асбест, цветные минеральные порошки и др.

Кровельный картон для изготовления рубероида получают из смеси хлопчатобумажного и льняного тряпья, бумажной макулатуры и целлюлозы. Такой картон хорошо пропитывается органическими вяжущими веществами и имеет достаточную прочность на разрыв. В зависимости от массы 1 м^2 картона (г) его делят на марки: А-350, А-420 и Б-350, Б-420. Чем выше марка картона, тем выше его прочность и другие качественные показатели.

По назначению рубероид подразделяют на кровельный и подкладочный (гидроизоляционный), а по разновидности посыпочного материала — на рубероид с крупнозернистой, чешуйчатой и пылевидной посыпкой. Кроме того, в зависимости от вида посыпки и массы одного квадратного метра основы (кровельного картона) рубероид подразделяют на марки. В марках рубероида первая буква — Р — означает рубероид; вторые буквы — К и П — кровельный или подкладочный материал; и, наконец, третьи буквы — К, П и Ч — указывают на разновидность посыпки: крупнозернистая, пылевидная или чешуйчатая. Рубероид марок РКК-420-А, РКЧ применяют для верхнего слоя кровель как на горячей, так и на холодной мастике, а рубероид марок РПК и РПП — для подкладочных слоев кровельного ковра. Так, например, рубероид кровельный с крупнозернистой посыпкой марок РКК-420-А и РКК-350-Б рекомендуют для устройства верхнего слоя кровельного ковра. Рубероид кровельный с пылевидной посыпкой РПП-350-Б используют для верхнего и нижнего слоев и, наконец, рубероид подкладочный с мелкозернистой и пылевидной посыпкой соответственно РПМ-300-А и РПЭ-300-А применяют для нижних слоев кровельного ковра и рулонной гидроизоляции.

Рубероид выпускают в рулонах по ширине полотна кровельного картона 1000, 1025 и 1050 мм с площадью полотнища рулона $10,0+0,5$ или $20,0 \text{ м}^2$. Производство рубероида включает следующие основные операции: приготовление пропиточной или покровной массы, подготовка посыпочных материалов, пропитка полотна кровельного картона, нанесение покровных слоев тугоплавкого битума или битума с наполнителем, нанесение посыпочного слоя; охлаждение, а затем резка материала на полотнища заданной длины и сворачивание в рулоны (рис. 15.3). Этот вид рубероида укладывают в кровлю с помощью приклеивающих мастик.

Рубероид кровельный наплавляемый изготавливают путем пропитки кровельного картона нефтебитумом малой вязкости с последующим нанесением на обе стороны слоев мастики (покровной массы), состоящей из битума марки БНК-90/30 с минеральным наполнителем и пластификатором (цилиндровое масло, vapor и др.) в определенных соотношениях масс. В отличие от обычного наплавляемый рубероид имеет с нижней стороны увеличенную толщину покровной массы. Так, если в обычном рубероиде количество покровной массы равно около $200\text{—}300 \text{ г/м}^2$, то в наплавляемом — $1000\text{—}2000 \text{ г/м}^2$ и более. Такой рубероид не приклеивают к основанию с помощью специальных мастик, а укладывают

путем подплавления нижнего покровного слоя горелками (горячий способ) или пластификацией этого слоя растворителем (холодный способ).

Производство наплавляемого рубероида осуществляется двумя способами: наливным (рис. 15.4, а) и окунанием (рис. 15.4, б). В обоих способах предусмотрен расход мастики сверху полотна 600 г/м^2 , снизу — от 600 до 2000 г/м^2 . Чем толще нижний слой, тем надежнее работает рубероид как гидроизоляция, хотя стоимость его возрастает. Этот рубероид выпускается шести марок: РК-420-1; РК-500-2,0; РЧ-350-1,0 — для верхнего слоя кровельного ковра и РМ-350-1,0; РМ-420-1,0; РМ-500-2,0 — для нижних слоев кровельного ковра. В этих марках первая цифра означает массу картона, г/м^2 , вторая — массу наплавляемой части мастики нижнего слоя рубероида, кг.

Перфорированный рубероид в отличие от обычного имеет в картоне отверстия диаметром 20 мм (перфорация), расположенные в шахматном порядке на расстоянии 100 мм друг от друга. Кровли с его применением «дышат», так как на их поверхности не возникает вздутий от давления пара снизу, а при деформациях основания не наблюдается разрывов кровельного ковра.

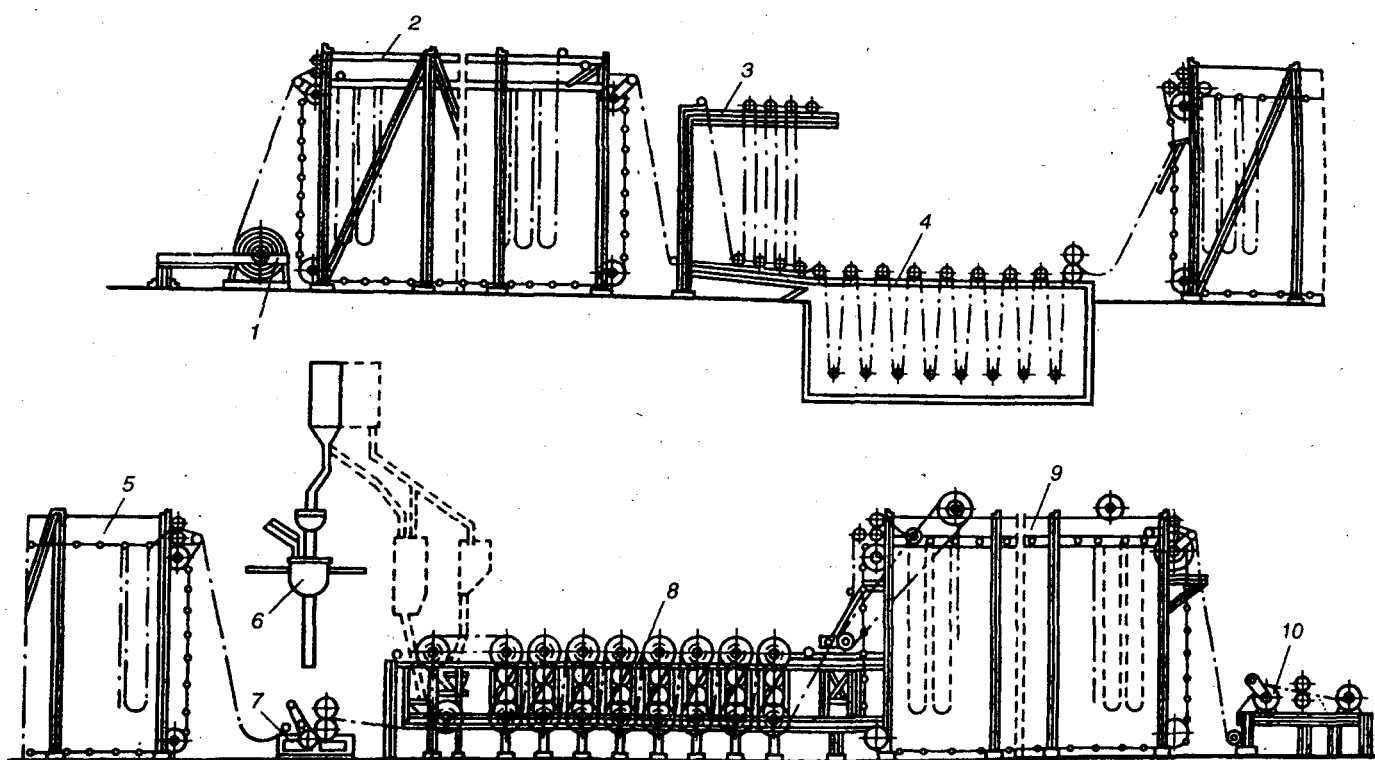


Рис. 15.3. Технологическая схема работы пропиточного агрегата непрерывного действия:

1 — станок для размотки картона; 2 — магазин запаса картона; 3 — установка предварительного полива картона; 4 — пропиточная ванна; 5 — обогатительная камера допропитки; 6 — смеситель; 7 — покровный лоток; 8 — посыпочно-холодильная секция агрегата; 9 — магазин запаса готового материала; 10 — смоточный станок

Стеклорубероид — рулонный кровельный и гидроизоляционный материал. Его изготавливают путем нанесения на стекловолоконную основу битумного вяжущего вещества с двух сторон. Он относится условно к третьему поколению, отличаясь от двух первых своей не гниющей основой. Лицевую сторону кровельного стеклорубероида покрывают крупнозернистой или чешуйчатой посыпкой, а внутреннюю — тонкодисперсными минеральными порошками. В отличие от кровельного, гидроизоляционный стеклорубероид с обеих сторон посыпают только тонкомолотыми минеральными порошками. Преимуществом стеклорубероида по сравнению с обычным рубероидом является большая прочность и стабильность стекловолоконной основы, что

способствует повышению противогнильной устойчивости и высокому сопротивлению разрушению в условиях повышенной влажности.

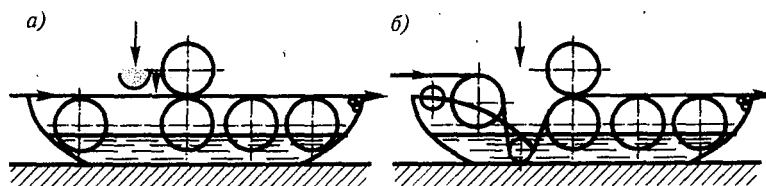


Рис. 15.4. Возможные способы нанесения покровной массы при изготовлении наплавляемого рубероида: а — наливом; б — окунанием с последующим намазыванием

Стеклорубероид, в зависимости от вида посыпки и назначения материала, выпускают в виде рулонов с площадью полотна $10,0 \text{ м}^2$ трех марок: С-РК — стеклорубероид кровельный с крупной посыпкой на лицевой стороне, С-РЧ — кровельный материал с чешуйчатой посыпкой на лицевой стороне и, наконец, С-РМ — стеклорубероид гидроизоляционный с мелкой или пылевидной минеральной посыпкой с двух сторон.

К числу рулонных кровельных и гидроизоляционных материалов на стеклооснове следует отнести также гидростеклоизол, стеклоизол, стеклобит и армобитэп.

Гидростеклоизол — кровельный и подкладочный материал. Он состоит из стеклоткани, обработанной с обеих сторон битумным вяжущим веществом. Кровельный гидростеклоизол применяют для устройства плоских кровель зданий и выпускают в рулонах с шириной полотна 850—1150 мм, длиной 10 м, толщиной 4—6 мм. Рулоны наматывают обычно на бумажную втулку.

Подкладочный гидростеклоизол используют в качестве гидроизоляции пролетных строений мостов, тоннелей, метрополитена и т.п.

Стеклоизол изготовляют путем покрытия стеклохолста резино-битумной мастикой. При замене стеклохолста стеклосеткой получают гидроизоляционный материал под названием «стеклобит».

Армобитэп — материал, получаемый на основе стеклохолста, стеклоткани или стеклосетки, с утолщенной покровной массой из битумно-каучуковых мастик. Его выпускают с мелкозернистой и крупнозернистой посыпкой. Армобитэп с крупнозернистой посыпкой предназначается для устройства верхнего слоя кровельного ковра; с мелкозернистой посыпкой используют для устройства гидроизоляции и подстилающих слоев кровли. Этот материал отличается высокой температуроустойчивостью, морозо-, водостойкостью и достаточной гибкостью.

К числу рулонных кровельных и гидроизоляционных материалов на незагниваемой основе следует отнести также металлоизол, фольгоизол и фольгобитэп. Аналогично стеклоизолу и армобитэпу в них также используют битумно-полимерные мастики, а основы — не гниющие (мембраны). Поэтому их называют также гидроизоляционными мембранами.

Металлоизол представляет собой гидроизоляционный материал, получаемый на основе отожженной алюминиевой фольги, покрытой с обеих сторон нефтяным битумом марки БЫ 90/10. Металлоизол выпускают в виде лент шириной до 460 мм при толщине фольги от 0,2 до 0,5 мм и длине ленты до 20 м.

Фольгоизол — рулонный кровельный и гидроизоляционный материал, состоящий из тонкой рифленой или гладкой алюминиевой фольги, покрытой с одной стороны резино-битумным или полимерно-битумным вяжущим веществом, смешанным с каким-либо минеральным наполнителем и антисептиком. Промышленность выпускает кровельный фольгоизол, предназначенный для устройства верхнего слоя кровли, и гидроизоляционный — для производства гидроизоляционных работ. Фольгоизол выпускают в рулонах длиной 10,0 м, шириной полотна $960\text{—}1000\pm 2$ мм при толщине

фольги до 0,3 мм. Этот материал отличается долговечностью и не требует ухода при эксплуатации.

Кроме того, фольгоизол имеет высокую прочность при разрыве, обладает гибкостью и водонепроницаемостью. Его применяют для устройства кровель и гидроизоляции ответственных зданий. Вследствие способности фольги отражать солнечные лучи кровля с применением этого материала нагревается меньше, нежели кровля черного цвета.

Фольгобитэп — гидроизоляционный материал, состоящий из тонкой рифленой фольги, покрытой с обеих сторон битумно-поли-мерным вяжущим в смеси с минеральным наполнителем и антисептиком. Используется в строительстве для производства кровельных и гидроизоляционных работ. На рынке имеются мембраны и другого наименования — днепрофлекс, филизол, изопласт и др.

При пропитке кровельного картона или другой основы каменноугольным дегтем получают дегтевые кровельные и гидроизоляционные материалы (толь кровельный и гидроизоляционный).

Толь кровельный покровный изготавливают путем пропитки кровельного картона каменноугольным или сланцевым дегтем с последующей песочной или крупнозернистой посыпкой. Его выпускают в рулонах с шириной полотна 1000, 1025 и 1050 мм. По виду посыпочно-го материала и массы (г) 1 м² кровельного картона толь делят на марки: ТКП-350 и ТКП-400, т. е. толь кровельный с песочной посыпкой. При этом величина зерен кварцевого песка должна быть в пределах 0,15—2,0 мм. ТКК-350 и ТКК-400 — толь с крупнозернистой посыпкой; величина зерен крупной посыпки — более 2 мм.

Толь с крупной посыпкой изготавливают путем нанесения на обе стороны полотна покровного слоя из тугоплавких дегтей с наполнителями. На лицевую сторону рулона напрессовывают слой крупнозернистой посыпки, а на нижнюю наносят пылевидную или мелкозернистую посыпку. Такой материал более долговечен, чем толь с песочной посыпкой, у которого пропиточный и покровный слои из одинаковых дегтей. Толь с песочной посыпкой применяют для устройства кровель временных сооружений и гидроизоляции каменных и деревянных частей зданий. Толь с крупнозернистой посыпкой используют для покрытия верхнего слоя пологих и плоских кровель и укладывают обычно на горячих дегтевых мастиках.

Кроме того, для гидроизоляционных работ используют толь гидроизоляционный с покровной пленкой марок ТГ-300 и ТГ-350, толь гидроизоляционный антраценовый ТАГ-350.

В результате пропитки кровельного картона дегтем с последующим покрытием с обеих сторон битумом и минеральной посыпкой получают дегтебитумные материалы. Их применяют для устройства многослойных и водоналивных кровель и укладывают на холодных или горячих битумных и дегтевых мастиках. Кроме того, эти материалы используют для устройства оклеечной гидроизоляции или пароизоляции конструкций и сооружений. Для этих видов работ часто применяют и гудрокамовые материалы, получаемые путем пропитки картона гудрокамом, отличающимся повышенной биостойкостью и атмосферостойкостью. К материалам для устройства мягкой кровли и гидроизоляции без покровного слоя относятся: пергамин, толь (в качестве основы используют кровельный картон) и гидро-изол на асбестовой или асбестоцеллюлозной основе.

Пергамин рулонный, беспокровный материал, получаемый путем пропитки кровельного картона мягкими нефтяными битумами (с температурой размягчения по «КиШ» не ниже 42°С). По своей конгломератной структуре он сходен с рубероидом. Однако основным отличием пергамина от рубероида является отсутствие на его поверхности покровных слоев и посыпки. Пергамин используют главным образом в качестве подкладочного материала под рубероид. Отрицательным свойством пергамина является его возгораемость и малая биостойкость. В настоящее время промышленность выпускает пергамин двух марок—П-300 и П-350. В качестве разновидности пергамина

промышленность выпускает фольгопергамин — рулонный двухслойный материал, состоящий из рифленой фольги и пергамина, наклеенного на нее специальным битумным вяжущим. Его применяют для гидроизоляционной защиты трубопроводов.

Толь беспокровный (толь-кожа) — рулонный кровельный и гидроизоляционный материал, изготавливаемый путем пропитки кровельного картона дегтем или различными дегтепродуктами.

Беспокровный толь по сравнению с пергамином имеет повышенную гнилостойкость и большую водонепроницаемость. Толь беспокровный используют как подкладочный материал под толь с посыпкой при устройстве кровель, а также для оклеенной гидроизоляции и пароизоляции. В многослойных плоских кровлях его укладывают на горячих дегтевых мастиках.

Гидроизол — беспокровный гидроизоляционный материал, изготавливаемый путем пропитки асбестового или асбестоцеллюлозного картона нефтяным битумом с температурой размягчения по «КиШ» не ниже 50°C.

Гидроизол отличается значительной гнилостойкостью и долговечностью. Он нашел широкое применение для оклеечной гидроизоляции подземных сооружений, гидроизоляции плоских кровель, а также для устройства противокоррозионного покрытия металлических трубопроводов. Гидроизол выпускают в рулонах с шириной полотна 950+5 мм двух марок: ГИ-Г и ГИ-К. При этом гидроизол марки ГИ-Г имеет более лучшие показатели по прочности, водопоглощению и водонепроницаемости, нежели материал марки ГИ-К.

Рулонные материалы без основы могут быть изготовлены из различных вяжущих веществ: резино-битумных, резино-дегтевых, битумно-полимерных, гудрокамовых и гудрокам-полимерных. К таким материалам, нашедшим применение в строительстве, относят изол, бризол и битумно-полимерный — ГМП.

Изол — кровельный и гидроизоляционный бесосновный материал с микроконгломератным типом структуры. Его получают на вальцах и каландрах путем прокатывания смеси резино-битумного связующего вещества, измельченного асбестового волокна, антисептика, пластификатора и других добавок. Толщина изола в рулоне 1,8—2 мм.

По техническим свойствам изол значительно превосходит рулонные материалы, изготавливаемые на основе кровельного картона. Он обладает хорошей гибкостью при отрицательных температурах, прочностью при растяжении не менее 0,4 МПа, малым водопоглощением (за 24 ч до 1%), достаточной гнилостойкостью и долговечностью.

Рулонный изол применяют для оклеечной гидроизоляции подвалов, фундаментов, тоннелей, бассейнов, мостов и других конструкций зданий и сооружений, антикоррозионной защиты трубопроводов, устройства пологих и плоских кровель и т. п.

Бризол — изоляционный материал, по структуре сходный с изолом. Его изготавливают путем прокатывания на каландрах битумно-резиновой массы, состоящей из смеси нефтяного битума, дробленой резины, асбестового волокна и пластификатора.

Отличительной особенностью бризола является повышенная стойкость к воде и некоторым агрессивным средам. Кроме того, он обладает повышенной гнилостойкостью, морозостойкостью, значительной погодоустойчивостью и эластичностью. Применяют бризол для антикоррозионной защиты металлических трубопроводов, а также подземных сооружений от воздействия грунтовых вод.

Из рулонных бесосновных материалов, изготавливаемых с битумно-резиновыми и резиногудрокамовыми композициями, перспективным является «биогимас». Этот рулонный материал производят из смеси гудрокам-битума и асбеста 6-го или 7-го сорта. «Биогимас» обладает высокой биостойкостью и может использоваться для гидроизоляции подземных сооружений (тоннели, гидроизоляции трубопроводов, оклеенная гидроизоляция, плоские кровли и т. п.).

Битумно-полимерный материал ГМП — высококачественный гидроизоляционный материал, получаемый путем смешения нефтяного битума БН-70/30 или БН-90/10, полиизобутилена и фенолофор-мальдегидного полимера с последующей минеральной посыпкой. ГМП выпускают трех марок в рулонах с шириной полотна 800—1000 мм при толщине 1—1,5 мм и общей площади полотна рулона 10 м². Используют в строительстве для устройства гидроизоляции, пароизоляции и многослойных кровельных ковров.

Применение рулонных кровельных и гидроизоляционных материалов позволяет устраивать мягкую кровлю с малым уклоном и сложной конфигурацией крыши; сокращает расходы на эксплуатацию кровли в условиях химической агрессии; повышает производительность и улучшает условия труда по устройству кровли и гидроизоляции.

При изготовлении рулонных материалов следует уделять особое внимание качеству составляющих и готовой продукции. При испытании рулонных материалов в лаборатории завода-изготовителя определяют прочностные показатели при разрыве, водонепроницаемость, водопоглощение, теплостойкость и другие свойства. Так, например, разрывное усилие рубероида (при разрыве полоски шириной 50 мм) должно быть не менее 320 Н; водопоглощение (стеклорубероид) — не более 0,5%; водонепроницаемость — при испытании образца материала под гидростатическим давлением, равном 0,07 МПа и прикладываемым в течение 10 мин, на нижней поверхности образца не должны появляться следы воды; теплостойкость для рубероида (температура, при которой не наблюдается сползания покровного слоя) должна быть не менее 80°С.

Рулонные материалы для устройства мягкой кровли высокого качества хранят в затемненном помещении в отдалении от источника тепла. Материалы с основой транспортируют в вертикальном положении (два ряда) и сверху один ряд в горизонтальном. Материалы без основы можно транспортировать в горизонтальном положении, но не более пяти рядов по высоте.

Из листовых и штучных изделий с органическими вяжущими наиболее широкое применение получили кровельные битумные листы, асфальтовые плиты и камни.

Кровельные битумные листы изготавливают путем пропитки плотной картонной основы битумом и нанесения покровного слоя, состоящего из тугоплавкого битума с 30% наполнителя. Температура размягчения пропиточного битума по «КиШ» должна быть не менее 60°С. В соответствии с массой 1 м² картона (г) листы выпускают двух марок: ЛБ-500 и ЛБ-650 с крупнозернистой цветной посыпкой. Фасонные битумные кровельные листы производят как прямоугольной, так и шестигранной формы на рубероидном агрегате. Их укладывают в верхние слои кровли.

Плиты гидроизоляционные (асфальтовые) могут быть армированные и неармированные. Неармированные плиты изготавливают прессованием горячей мастики или асфальтобетонной массы в изделие заданных размеров (100х60х2 см).

Армированные плиты получают путем прессования асфальтобетонной массы вместе с предварительно покрытой битумом стеклотканью или металлической сеткой.

Армированные плиты имеют размеры (200—120)х(75—120)х(2—4) см. Асфальтовые плиты иногда применяют для устройства оклеечной гидроизоляции и заполнения деформационных швов.

Асфальтовые армированные маты изготавливают на основе стеклоткани, предварительно пропитанной битумом, с последующим покрытием с обеих сторон слоем битума или гидроизоляционной мастики. В зависимости от вида пропиточного материала и покровного слоя такие маты разделяют на обычные и с повышенной теплостойкостью. Их производят в виде плит длиной 3—10 м, шириной до 1 м при толщине мата 4—6 мм.

Асфальтовые армированные маты применяют в основном для устройства оклеечной гидроизоляции.

Гидроизоляционные камни могут быть получены путем пропитки штучных изделий из пористых материалов (кирпич, бетон, туф, опоки, мел и т. п.) битумом, дегтем, петролеатумом и другими органическими гидрофобизирующими веществами. Легче других

получать кирпичи (глиняный или силикатный), пропитанные битумом при температуре 180—200°C на глубину 10—20 мм.

Применяют битумированные кирпичи для устройства гидроизоляции в виде кладки и футеровки на цементном или асфальтовом растворе.

Гидрофобный газоасфальт — теплоизоляционный материал, изготавливаемый из битумо-известковой пасты с добавлением 10—50% по массе портландцемента и газообразователя (алюминиевая пудра). Его используют для кровельных панелей и теплогидроизоляции трубопроводов.

Для устройства кровли в последние годы рекомендуется *металлочерепица* как пластичный архитектурно-выразительный материал в виде многослойного изделия. Представляет собой горячеоцинко-ванную листовую сталь толщиной 0,5 мм, покрытую после пассивации и грунтовки слоем цветного полимера. Металлочерепица обладает высокими эксплуатационными свойствами по коррозионной стойкости, долговечности и пластическому деформированию, что, естественно, очень важно при изготовлении кровельных покрытий. Из металлических наиболее долговечной признается медная; более дешевая и тоже долговечная — из Д-цинка (титан-цинк). Это экологически чистый материал. В Москве такой кровлей покрыты гостиница «Балчуг», Исторический музей и др.

В практике зарубежного строительства видное место занимает цементно-песчаная черепица. Она привлекательна невысокой стоимостью, простотой изготовления, прочностью, долговечностью, а также красочным видром кровли, поскольку при ее изготовлении используют цветной цемент или вводят в ее состав пигменты. В настоящее время примерно $\frac{2}{3}$ объема производства покрытий за рубежом выполнены из этого кровельного материала. Технологическое оборудование используется в широком диапазоне — от ручных способов с производительностью 1—1,5 тыс. шт. в смену до полностью автоматизированных установок с выпуском до 45 тыс. шт. в смену. Окрашивание производится по всему объему изделий либо поверхностным напылением одного-двух цементных составов с отделкой гранулятом из цветного песка по пластмассовой эмульсии. Основные цвета красный и коричневый. Производство цементно-песчаной черепицы понемногу осваивается и в нашей стране.

Выпускается черепица разных типов — римская, венская, альпийская (плоская). При ее изготовлении используют пресс-прокатную технологию: формование на непрерывно движущейся ленте из фигурных поддонов с уплотнением верхней поверхности роликом. Тепловлажностная обработка производится на поддонах. Следует отметить, что в зарубежной практике используют только сухие, мытые, фракционированные пески и высокоактивные чистоклинкерные цементы. Вместо пресс-прокатной технологии можно использовать вибропрессование, принятое в нашей стране при изготовлении тротуарных плит и при применении менее качественных и однородных исходных материалов, с использованием для формования плоских поддонов¹.

¹ Львович К. Вибропрессованная цементно-песчаная черепица // Стройка. 2000. 7.

Материалы для отделочных работ: краски, лаки, обои**16.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Для внешней и внутренней отделки зданий и сооружений служат различные отделочные материалы и изделия. Они предназначены для повышения эксплуатационных и эстетических качеств и стойкости строительных элементов против атмосферных и других воздействий, придания им архитектурно-выразительного оформления. Разнообразие отделочных материалов достигается рациональным сочетанием их вещественного состава и форм, придаваемых отдельным изделиям. Особо высокая эффективность в архитектурной выразительности достигается использованием широкой гаммы цветов в результате применения многоцветных пигментов в красочных составах, а нередко и в сырьевых — при производстве основных однородных и конгломератных материалов и изделий. К их числу относятся: декоративный и цветной бетоны, цветной асфальтовый бетон и раствор, керамическая плитка и иные изделия из декоративной керамики, изделия из природных каменных материалов разных размеров и форм, а также искусственное, имитирующие природные материалы по текстурно-структурным признакам (мраморы, граниты и др.), цветные кровельные покрытия — металлочерепица, цементно-песчаная черепица и др. К ним относится еще и цветное стекло (смальта), впервые предложенное и использованное для мозаичных изделий М.В. Ломоносовым в середине XVIII в. Формированию эффективной отделки способствуют также металлические материалы, древесные и особенно широко — органические полимерные вещества. Отдельные разновидности отделочных изделий изготавливают и из асбестоцементных, силикатных, картонно-бумажных и других материалов, причем самым удобным отделочным материалом для стен служат обои. Но, как отмечено выше, наиболее альтернативными в отделочных работах всегда являются красочные, или точнее, лакокрасочные материалы. Им посвящена данная глава. В настоящее время окраска в общем объеме отделочных работ фасадов зданий составляет более 50%.

Лакокрасочными называют природные или синтетические материалы, наносимые в жидком состоянии на поверхность изделия тонким слоем и образующие после отвердевания покровные пленки. Покрывают изделия или конструкции лакокрасочными материалами с целью защиты их от вредного воздействия атмосферы, пара и газов, предохранения от коррозии, загнивания и возгорания, но главное, для повышения художественно-архитектурного качества фасадов и внутренних помещений жилых и промышленных зданий.

К лакокрасочным материалам относят: готовые красочные вещества (строительные краски), которые предназначены для образования непрозрачного декоративного и защитного покрытия заданного колера; связующие вещества, пигменты и красители, служащие для изготовления красочных веществ; лаки, применяемые для образования отделочного прозрачного покровного слоя; эмали и вспомогательные материалы — шпаклевки и грунтовки, растворители и разжижители лаков и красок, пластификаторы и отвердители полимерных составов и некоторые специальные добавки, например сиккативы.

В настоящее время наибольшее значение приобретают синтетические лакокрасочные материалы, эмульсионные краски и новые минеральные красочные вещества, иногда требующие перед употреблением введения растворителей или разбавителей.

Качество лакокрасочных покрытий обуславливается главным образом пленкообразующим веществом. В зависимости от его разновидности установлена номенклатура лакокрасочных материалов. Основными компонентами этих материалов служат связующие вещества, пигменты и наполнители. Связующие вещества сцепляют частицы

пигмента и наполнителя, образуют прочную пленку (слой) на обрабатываемой поверхности.

Связующими веществами могут быть: олифы — в масляных красках; полимеры — в полимерных красках, лаках и эмалях; каучуки — в каучуковых красках; клеи — в клеевых красках; неорганические вяжущие — в цементных, известковых и силикатных красках.

16.2. ИСХОДНЫЕ ОСНОВНЫЕ СВЯЗУЮЩИЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для красочных веществ (красок) в качестве связующих органического происхождения и их ингредиентов применяют олифы, клеи, полимеры, растворители, пластификаторы (мягчители).

Олифы являются основным связующим веществом для приготовления масляных красочных веществ. Они могут быть натуральными, полунатуральными и искусственными (синтетическими).

Натуральные олифы продукты нагрева до температуры 160—270°C («варки») растительных высыхающих масел (льняного, конопляного, тунгового) при непрерывном перемешивании и продувании (через масло) воздуха.

В целях ускорения высыхания олифы в процессе варки масел в них добавляют сиккативы — соли оксидов свинца, марганца, кобальта или растворы других металлических солей жирных кислот в органических растворителях. Таким образом, при приготовлении натуральной олифы осуществляется процесс полимеризации исходного мономера. Например, льняное масло по своей химической природе является глицерином, т. е. сложным эфиром трехатомного спирта, глицерина — $C_3H_5(OH)_3$ и жирных непредельных кислот. В результате продолжительного нагревания при температуре около 270°C или продувании горячего воздуха (окисации) молекулы масла соединяются друг с другом по месту двойных связей, имеющих у жирных кислот, т. е. полимеризуются, образуя макромолекулу полимера, — олифы. Пленка, полученная после высыхания полимеризованного масла — натуральной олифы, содержит 100% масла и отличается повышенной водостойкостью, эластичностью, достаточной прочностью, гляцевитостью и атмосферостойкостью. Натуральные олифы применяют в строительстве для получения высококачественных красочных веществ. Вследствие дефицитности сырья их используют лишь для окраски металлических конструкций, оконных переплетов зданий, приготовления оконной замазки и т. п.

Полунатуральные олифы — вязкие продукты термообработки («варки») при температуре до 300°C некоторых полувысыхающих и невысыхающих растительных масел — подсолнечного, соевого или хлопкового. Кроме того, уплотнение масел при получении таких олиф достигается окислительной полимеризацией, путем продувания через слой масла воздуха, нагретого до 150°C. Полученные вязкие полимеризованные масла разбавляют до жидкой консистенции органическими растворителями.

Полунатуральные олифы бывают: олифа-оксоль, оксоль-поли-меризованная, оксоль-смесь. Такие олифы содержат до 45% органических растворителей и позволяют экономить исходные масла. Так, например, олифа-оксоль — продукт окисления продуванием воздуха при нагревании льняного или конопляного масла с последующим добавлением растворителя (уайт-спирита) — широко используется для малярных работ в сооружениях I и II классов. В зависимости от исходного сырья олифу-оксоль выпускают двух марок: В и ПВ. Олифы марки В (из льняного или конопляного масла) используют для наружных и внутренних малярных работ. Олифу марки ПВ (из подсолнечного и других масел) используют для малярных работ только внутри помещений. Полунатуральные олифы имеют более широкое применение в строительстве, чем другие виды олиф. Следует отметить, что олифа-оксоль и натуральные олифы являются пожаро- и взрывоопасными материалами.

Пленки затвердевших полунатуральных олиф отличаются (по сравнению с пленками натуральных олиф) меньшей эластичностью, быстрым старением и меньшей долговечностью.

Искусственные (синтетические) олифы представляют собой пленкообразующие вещества, получаемые из непищевых продуктов и в отличие от натуральных или полунатуральных олиф, не содержат растительных масел или могут содержать их не более

30% по массе. Наибольшее применение в строительстве получили алкидные олифы: глифталевая, пентафталевая, состоящие из 50% алкидной основы и 50% уайт-спирита, олифа-синтоль и олифа-карбоноль.

Глифталевая олифа является раствором глифталевого полимера в уайт-спирите с добавлением до 35% растительных масел. Олифа-синтоль - раствор продуктов окисления керосина в бензоле или некоторых других органических растворителях. Олифа-карбоноль — раствор алюминиевых и кальциевых солей некоторых органических кислот в уайт-спирите. Эти олифы предназначены для изготовления масляных и алкидных красочных веществ, а также используются при разбавлении густотертых красок до малярной консистенции.

Для характеристики и оценки качества олиф (натуральных и полунатуральных) определяют их вязкость, цвет, прозрачность, количество сиккатива и растворителя, продолжительность высыхания, эластичность пленки на изгиб. Кроме того, часто определяют число омыления, кислотное и йодное числа.

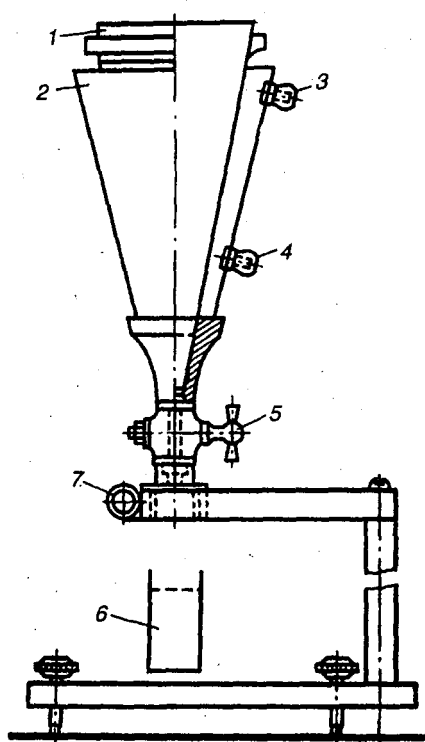


Рис. 16.1. Определение вязкости натуральных олиф с помощью воронки НИЛКа:

1 — воронка; 2 — водяная рубашка; 3 — штуцер для выпуска воды; 4 — штуцер для впуска воды; 5 — кран для выпуска 100 мл олифы; 6 — колба мерная; 7 — выходное отверстие воронки

Вязкость относится к одному из важных показателей их качества. При значительной вязкости олифы красочное вещество с трудом распределяется на окрашиваемой поверхности, при малой вязкости — краска стекает с наклонных поверхностей. Вязкость олиф определяется с помощью специальных приборов (воронка НИЛКа, вискозиметр ВЗ-4) и характеризуется временем истечения в секундах 100 мл испытуемого материала из стандартного отверстия прибора при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Так, например, вязкость натуральных олиф при температуре 20°C , определенная с помощью воронки НИЛКа (рис. 16.1), составляет 4—5 с. Вязкость тех же олиф по вискозиметру ВЗ-4 — 30 с.

Число омыления — количество миллиграммов щелочи, необходимое для омыления 1 г олифы. Чем большее количество кислот содержится в олифе, тем больше число омыления. В олифах хорошего качества число омыления не менее 185.

Кислотное число показывает содержание свободных жирных кислот в маслах, олифах, лаках и характеризует продолжительность их высыхания. Оно соответствует количеству

щелочи КОН, требующейся для нейтрализации свободных жирных кислот в 1 г масла. Высокое содержание свободных жирных кислот в олифе приводит к нежелательному замедлению процесса высыхания. Кислотное число натуральных олиф должно быть не более 6—7.

Йодное число показывает количество галоида в граммах (в пересчете на йод), вступающего в химическое соединение со 100 г испытуемого масла. Этот показатель характеризует степень ненасыщенности (содержание кратных, двойных связей) масла, олифы и других алифатических соединений. Йодное число характеризует также способность масел к высыханию. Чем выше йодное число, тем интенсивнее протекают процессы окисления и полимеризации, тем быстрее олифа образует на окрашиваемой поверхности однородную и прочную пленку. Для натуральных олиф йодное число должно быть не ниже 160.

Продолжительность высыхания (отверждения) — это процесс превращения жидкой олифы в твердую[^] достаточно прочную пленку. Различают высыхание «от пыли», т. е. момент образования тончайшей поверхностной пленки на слое олифы (степень 1) и полное высыхание по всей толщине нанесенного слоя (степень 3). Обычно натуральные олифы высыхают (отверждаются) под воздействием кислорода воздуха за 12 ч, а за 24 ч при нормальной комнатной температуре происходит полное высыхание слоя.

Клеи для красочных веществ и приклеивания отделочных материалов. В качестве пленкообразующих органических веществ в клеевых красочных составах используют животные, растительные, искусственные и полимерные клеи, обладающие высокой адгезионной способностью. В строительных красочных составах чаще всего применяют клеи следующих видов.

Животные клеи — мездровый, костный, казеиновый. Мездровый клей получают путем разваривания в воде мездры (кожных покровов животных) с последующим сгущением и сушкой раствора. Такой клей производят в виде плиток, дробленого и чешуйчатого клея. Костный клей — продукт переработки клеящего вещества, получаемого из обезжиренных костей животных. По техническим свойствам костный клей близок к мездровому, а именно; стойкость против загнивания стандартного 18%-го раствором 3 суток, рН в растворе — 5,6—6,0. Казеиновый клей в виде порошка состоит из казеина, гашеной извести, некоторых минеральных солей и керосина. Казеин (кислотный) получают воздействием минеральных или органических кислот на снятое молоко с последующей сушкой. Казеиновый клей не должен содержать посторонних примесей, следов плесени и гнилостного запаха. Его различают по маркам: «Экстра» (В-107) и «Обыкновенный» (ОБ). Для приготовления красок на животных клеях в раствор добавляют антисептик — формалин, а в казеиновых клеях следует использовать щелочестойкие пигменты.

Клеи растительные — декстрины — получают в результате обработки крахмала кислотой или нагреванием его при температуре 150—200°С. Декстриновый клей широко применяют в красочных веществах, клеевых шпаклевках, грунтовках, для наклеивания бумажных обоев.

Клеи искусственные представляют собой растворы модифицированных природных полимеров в воде. В водно-клеевых красочных составах чаще всего они используются в виде карбоксилметилцеллюлозы и метилцеллюлозы. Карбоксил-метилцеллюлоза — продукт химической переработки древесной целлюлозы, способной набухать и растворяться в воде. Метилцеллюлоза по сравнению с карбоксил-метилцеллюлозой обладает большей стойкостью по отношению к воздействию агрессивных сред (кислот и щелочей).

Клеи синтетические — полимерные синтетические продукты, обладающие высокой клеящей (адгезионной) способностью. Эти клеи используют в виде эмульсий или водных и спиртовых растворов.

Строительные синтетические клеи и растворы высокомолекулярных органических веществ применяют для соединения конструктивных элементов из древесины, бетона,

стали, стекла и других материалов. Эти клеи должны иметь высокую адгезию к склеиваемым материалам; прочность клеевых соединений не ниже прочности склеиваемых материалов; долговечность в условиях эксплуатации конструкции; необходимую вязкость, быстрое отверждение и малую стоимость.

Различают клеи, получаемые на основе: а) поликонденсационных полимеров — эпоксидных, феноло- и мочевиноформальдегидных; б) полимеров реакции полимеризации — поливинилацетата, полиакрилата и др. Подразделяются также клеи по температуре их отверждения: горячего при температурах 100—160°C, теплого — 40—90°C и холодного — 16—30°C. Наибольшее применение в строительстве имеют клеи холодного отверждения, позволяющие склеивать элементы конструкций из различных материалов при комнатной температуре, без применения сложного оборудования.

Клеи на эпоксидной основе используют для соединения конструкций из стали и легких сплавов, а также для соединения элементов железобетонных конструкций.

Значительное применение в строительстве находят клеи, предназначенные для крепления облицовочных материалов, приклеивания ковров, линолеумов и т. п. Так, например, клей К-17 (МФ-17), состоящий из Мочевиноформальдегидного полимера, наполнителя, древесной муки и отвердителя (щавелевой кислоты), используют для крепления декоративного бумажно-слоистого пластика, а также древесноволокнистых и древесностружечных плит к дереву.

Универсальный клей «Бустилат-М» — белая, сметанообразная водная дисперсия латекса, мела, натрийкарбоксиметилцеллюлозы и поваренной соли — широко используется при наклеивании синтети- ческих ковров, линолеума, облицовочных плиток, пленочных материалов и обоев на различные основания.

Поливинилацетатные клеевые дисперсии — продукты полимеризации винилацетата в водной среде в присутствии иницирующих и других компонентов. Такие дисперсии выпускают следующих марок: непластифицированные — Д50Н, Д50С, Д50В и Д60В и пластифицированные — ДФ48/5С, ДФ48/5НЛ и др. Буквенные обозначения показывают: Д — дисперсия; Ф — пластификатор (дибутилф-талат); Н — низковязкая; С — средневязкая; В — высоковязкая; Л — лакокрасочная. Первые две цифры в марках указывают на содержание полимера в процентах, а последующие — на содержание пластификатора. Поливинилацетатными дисперсиями пользуются при приклеивании различных облицовочных материалов, а также полимерных пленок, синтетических и ворсовых ковров, декоративного бумажно-слоистого пластика и др.

Клей АДМ-К представляет собой сополимер бутилакрилата, винилацетата и метакриловой кислоты, модифицированных канифолью, с наполнителем (каолином). По внешнему виду АДМ-К — однородная, пастообразная масса без каких-либо посторонних включений. Этот клей используют для приклеивания поливинилхл оридных материалов к бетону, деревянному основанию, цементной стяжке.

Растворители и разбавители. Растворители — жидкие среды, в которых равномерно распределяется растворяемое вещество. Они не вступают в химическое взаимодействие с растворяемым веществом и легко испаряются при высыхании раствора. Органические растворители предназначают для масляных красок и лаков, глифталевых и битумных веществ, эпоксидных, перхлорвиниловых и нитроцеллюлозных лаков и красок. Для растворения лакокрасочных материалов при производстве клеев и мастик с целью придания им заданной вязкости наибольшее распространение получили: скипидар, уайт-спирит, ацетон, этилацетат, сольвент каменноугольный, нефрас С-50/170 и др.

Скипидар — слабоокрашенная или бесцветная жидкость с характерным запахом — продукт деструктивной (без доступа воздуха) перегонки смолистой древесины сосны (древесный скипидар) или разгонки смолы хвойных деревьев (живичный скипидар). Древесный скипидар подвергают дополнительной химической очистке для удаления красящих веществ. К основным характеристикам скипидара относятся его нетоксичность, плотность, равная 0,86—0,88 г/см³, и температура кипения — 153—160°C. Нетоксичность

скипидара позволяет использовать его для внутренних отделочных работ. Его применяют также для разведения масляных, алкидных и других лакокрасочных составов. Он легко воспламеняется и взрывоопасен.

Уайт-спирит — слегка окрашенная жидкость — продукт перегонки нефти, средняя фракция между тяжелым бензином и тракторным керосином. Вследствие доступности и нетоксичности этого растворителя его используют в малярных работах при внутренней и наружной отделке. Плотность уайт-спирита около $0,78 \text{ г/см}^3$, температура начала кипения не более 165°C . Он предназначен также для растворения масляных лаков и красок, смывки ранее нанесенных за-твердевших пленок масляных лаков и красочных составов. Растворяющая способность уайт-спирита ниже, чем у скипидара.

Технический ацетон — бесцветная, прозрачная, легколетучая жидкость с характерным запахом (температура кипения 57°C), смешивающаяся с водой и спиртом в различных отношениях. Его получают при сухой перегонке древесины или синтетическим путем. Является хорошим растворителем многих органических веществ, в том числе жиров и некоторых синтетических полимеров, благодаря чему имеет широкое применение в лакокрасочной промышленности.

Этилацетат — прозрачная жидкость без механических примесей. Плотность растворителя $0,88 \text{ г/см}^3$, температура кипения $77,2^\circ\text{C}$, растворимость в воде — не более 8%. Он токсичен и огнеопасен, поэтому имеет ограниченное применение.

Сольвент каменноугольный — прозрачная и бесцветная жидкость — продукт коксохимического производства, получаемый в процессе ректификации фракций сырого бензола. Плотность около 8 г/см^3 ; используется для разведения перхлорвиниловых, глифталевых и битумных лаков и красок в смеси с уайт-спиритом. Однако повышенная токсичность этого растворителя ограничивает его применение для производства внутренних отделочных работ.

Нефтяной растворитель (нефрас) С-50/170 — прозрачная жидкость с характерным запахом нефтепродукта (бензин для промышленных, технических целей). Он испаряется и воспламеняется, температура воспламенения — 435°C .

Для приготовления лаков и красок применяют и другие органические вещества и смеси ацетонов, бутилацетата, ксилола и др.

Разбавители — жидкости, не растворяющие пленкообразующие вещества, а лишь уменьшающие вязкость красочных веществ. Они, в отличие от растворителей, могут содержать связующие вещества. Разбавителями служат олифы или масляные эмульсии типа «вода в масле».

16.3. ПИГМЕНТЫ В КРАСОЧНЫХ СОСТАВАХ

Пигментами называют тонкодисперсные цветные порошки, чаще минеральные, нерастворимые в пленкообразующих веществах или органических растворителях, но способные равномерно смешиваться с ними. От разновидности пигмента зависит цвет (колер) лакокрасочного покрытия, его долговечность, устойчивость против воздействия атмосферных факторов, агрессивных сред и повышенных температур. Благодаря способности избирательно отражать лучи дневного света, пигменты обладают различным цветом. Так, например, пигменты, почти полностью отражающие свет, кажутся белыми, и, напротив, пигменты, поглощающие световые лучи, придают красочному составу черный цвет. Пигменты бывают неорганические и органические, искусственные и природные. Для приготовления строительных красок используют, главным образом, неорганические пигменты вследствие их большей атмосферостойкости и химической стойкости.

Искусственные неорганические пигменты получают в результате сложных химических процессов. Такие пигменты состоят почти полностью из оксидов и солей металлов (белила, кроны, ультрамарин, лазурь малярная и др.). Природные пигменты, хотя и уступают искусственным по яркости и насыщенности колера, однако значительно дешевле. Их получают в результате переработки руд и глин, содержащих значительное количество примесей оксида железа (железный сурик, мумия, охра и др.).

Пигменты характеризуются химическим составом, дисперсностью, укрывистостью, плотностью, маслосемкостью, красящей способностью, светостойкостью, химической стойкостью, огнестойкостью и стойкостью против коррозии. *Химический состав* обуславливает цвет, коррозионную и химическую устойчивость, термостойкость, *укривистость* — способность краски (приготовленной на олифе и пигменте) закрывать первоначальный цвет при равномерном нанесении на поверхность. Чем меньше слой краски, закрывающей первоначальный цвет окрашиваемой поверхности, тем выше укрывистость пигмента. Укрывистость характеризуется количеством пигмента в граммах на 1 м² окрашиваемой поверхности. *Красящая способность* (интенсивность цвета) — свойство пигмента передавать свой цвет в смеси с белыми, черными или синими пигментами. *Маслосемкость* — способность пигмента удерживать определенное количество масла. Она характеризуется количеством масла (% по массе), которое необходимо добавить к пигменту для получения красочной пасты. Чем меньше масла (олифы) требует пигмент для получения красочной пасты, тем выше стойкость красочного покрытия и больше укрывистость пигмента. *Дисперсность* — тонкость помола частиц пигмента — оказывает значительное влияние на его укрывистость и красящую способность. Чем меньше частицы пигмента, тем выше его укрывистость и красящая способность. Однако размеры частиц пигмента не должны превышать толщину пленки красочного покрытия во избежание шероховатостей и неровностей. Наибольшая укрывистость пигмента достигается при измельчении его в пределах 0,2—10 мкм. *Светостойкость* — способность пигмента сохранять свой цвет под воздействием света. Эта способность пигментов имеет большое значение при выборе их для окраски наружных поверхностей конструкций и фасадов зданий и сооружений. *Атмосферостойкость* — способность пигмента, не изменяя цвета, противостоять воздействию атмосферных факторов: кислорода воздуха, сернистых и других газов, а также попеременному замораживанию и оттаиванию, увлажнению и высыханию. *Химическая стойкость* — способность не изменять первоначального цвета под воздействием щелочей и кислот. *Огнестойкость* — способность не разрушаться и не изменять свой цвет от воздействия высоких температур. *Антикоррозионная стойкость* — способность пигмента в красочном составе предохранять от ржавления черные металлы. Некоторые пигменты обладают весьма высокими антикоррозионными свойствами (свинцовый и железный сурик, свинцовые белила и др.).

Выбор пигмента и красочного состава обуславливается главным образом назначением покрытия и стоимостью вещества. При выборе пигмента учитывается его безвредность для здоровья работающих. Если в химический состав входят соединения свинца (свинцовые белила, свинцовый сурик и др.), то они токсичны и требуют соблюдения правил охраны труда.

В целях экономии пигментов и придания краскам повышенной кислото- и огнестойкости в них вводят наполнители — тонкодисперсные неорганические вещества обычно белого цвета. В качестве наполнителей в красочных составах используют каолин, измельченный тальк, пылевидный кварц, асбестовую пыль и др.

Пигменты обычно группируют по цвету — белые, черные, красные и коричневые, желтые, синие и зеленые.

Белые пигменты могут быть искусственные и природные. Из искусственных белых пигментов, получаемых путем химической переработки минерального сырья, широко используют: цинковые, свинцовые, титановые белила и литопон (сернистые белила).

Цинковые белила — оксид цинка ZnO с небольшим количеством примесей — изготавливают из цинковых руд или металлического цинка. Содержание оксида цинка должно быть не менее 92%, плотность — $5,6 \text{ г/см}^3$. Укрывистость цинковых белил в пределах $100\text{—}110 \text{ г/м}^2$, они светостойки, не ядовиты. Их используют при приготовлении красок и эмалей, главным образом для внутренних покрасок.

Свинцовые белила по химическому составу представляют собой основную углекислую соль свинца $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$. Они укрывисты, атмосферостойки и применяются для наружных покрасок металлических конструкций. Однако вследствие значительной токсичности использование их в строительстве ограничено.

Титановые белила — по химическому составу диоксид титана TiO_2 — изготавливают в виде тонкого порошка двух кристаллических модификаций. Они являются лучшими из существующих белил и по укрывистости превосходят все другие виды белых пигментов. Их укрывистость составляет $50\text{—}70 \text{ г/м}^2$, плотность $4,24\text{—}3,84 \text{ г/см}^3$. Они обладают высокой стойкостью к воздействию атмосферы, кислот, щелочей и повышенных температур. Вследствие нетоксичности их широко применяют при приготовлении красок, эмалей для наружных и внутренних отделочных работ.

Литопон (белила литопонные) по химическому составу представляет собой смесь сульфида цинка (ZnS) и сульфата бария ($BaSO_4$). Литопон выпускают в виде порошка и используют при приготовлении красок и эмалей для внутренней покраски. Поскольку на свету литопонные белила желтеют, их обычно применяют в смеси с голубыми пигментами. Укрывистость этих белил не более 110 г/м^2 , плотность — $4,1\text{—}4,3 \text{ г/см}^3$.

Мел как пигмент и наполнитель используют для разбеливания цветных красочных веществ. Его применяют также для приготовления клеевых и силикатных красок. Для масляных красок его не используют, поскольку в смеси с олифой получаются пленки с желтым оттенком.

Известь воздушную применяют для побелки фасадов промышленных и гражданских зданий.

Черные пигменты — сажа газовая (малярная), нефтяная, перекись марганца и тонкомолотый графит. Сажа малярная представляет собой тонкодисперсный порошок почти чистого углерода. Ее получают путем неполного сжигания различных углеродосодержащих веществ (нефти, природного газа, твердых органических веществ и др.). Сажа обладает высокой красящей способностью, укрывистостью и стойкостью к воздействию щелочей и кислот. Ее используют для получения красочных составов черного колера. Плотность сажи — $1,65\text{—}2,0 \text{ г/см}^3$.

Перекись марганца (MnO_2) в тонкодисперсном состоянии образует черный пигмент со значительной кроющей способностью. Этот пигмент получают из природной марганцевой руды и широко используют для красочных составов черного колера.

Графит (шунгит) — пигмент серовато-черного цвета; по химическому составу отличается высоким содержанием углерода (до 95%). Графит часто используют для приготовления масляных красочных веществ, обладающих стойкостью к действию кислот и высоких температур.

Красные и коричневые пигменты — мумия искусственная и природная, сурик железный, крон красный, сурик свинцовый и др.

Мумия искусственная — светостойкий пигмент красного цвета, изготавливаемый путем прокаливания железного купороса совместно с породами, содержащими углекислый кальций (мел, известняк). Вследствие высокой красящей и кроющей способности мумию искусственную широко применяют для всех видов покрытия по дереву и штукатурке.

Мумия природная — тонкодисперсный порошок глины, окрашенный оксидом железа в красные тона. В зависимости от содержания Fe_2O_3 цвет мумии меняется от светлого до темно-коричневато-красного. Природную мумию, благодаря высокой светостойкости и малой стоимости, широко применяют для приготовления масляных и клеевых красок.

Сурик свинцовый — оранжевый или красный порошок, получаемый путем прокаливания свинцового глета. Это — токсичный и весьма тяжелый пигмент (плотность 8,32—9,16 г/см³) по химическому составу представляет собой свинцовую соль ортосвинцовой кислоты (Pb_3O_4). Свинцовый сурик применяют в антикоррозионных масляных красочных составах.

Крон красный отличается высокой светостойкостью и способностью предохранять стальные конструкции от коррозии. По химическому составу он представляет собой основной хромовокислый свинец ($\text{Pb} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_4 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$). По внешнему виду этот пигмент оранжевого цвета.

Сурик железный — пигмент коричневого цвета, содержащий не менее 75% (по массе) Fe_2O_3 . Отличается высокой стойкостью к воздействию агрессивных факторов и широко применяется для покраски металлической кровли.

Редоксайд — красный железоокисный пигмент, отличающийся повышенной стойкостью к воздействию щелочной среды.

Желтые пигменты — кроны различных оттенков (от лимонно-желтого до оранжево-красного) и охры.

Крон свинцовый — искусственный пигмент, получающийся в результате химического взаимодействия хромпика с солями свинца. По химическому составу он представляет собой хромовокислый свинец $\text{Pb}(\text{CrO}_4)$. В зависимости от химического состава и технологии изготовления цвет его изменяется от светло-лимонного до темно-желтого. Благодаря высокой кроющей способности и антикоррозионной стойкости свинцовые кроны используют в лаковых и масляных красочных составах по металлу и дереву. Укрывистость крона от 40 до 190 г/м², плотность составляет 6,12 г/см³.

Крон цинковый выпускают в виде порошка светло-желтого цвета. По химическому составу — смесь хромовокислого цинка и хромового ангидрида. Цинковый крон растворяется в щелочах, кислотах и частично в воде. Укрывистость его 120—170 г/м², плотность — 3,46 г/см³.

Охры — природные пигменты желтого, коричневого и красного цветов. Их получают из глин, содержащих до 25% (по массе) Fe_2O_3 . Цвет охры зависит от содержания оксидов железа. Укрывистость этих пигментов — 65—85 г/м², плотность — 2,6—3,4 г/см³. Охры являются наиболее дешевыми пигментами и широко применяются для приготовления красок на основе различных связующих.

Синие пигменты — ультрамарин и лазурь малярная.

Ультрамарин — порошок синего цвета, по химическому составу представляет собой алюмосиликат натрия, содержащий серу в коллоидном состоянии. Его получают путем обжига композиций каолина с содой и серой или сернокислого натрия с углем. Химический состав ультрамарина можно выразить формулой ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{S}_2\text{O}_{12}$). Наиболее

широкое распространение получил синий ультрамарин, используемый для подцветки в масляных составах в целях устранения желтых оттенков.

Лазурь — искусственный пигмент в виде темно-синего порошка. По химическому составу — железная соль железисто-синеродистой кислоты ($\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN}_6)]_3$). Лазурь — светостойкий пигмент, однако разрушается под действием щелочей и поэтому не применяется для покрасок по штукатурке и цементным растворам.

Зеленые пигменты — оксид хрома, зелень цинковая, зелень свинцовая хромовая и др.

Оксид хрома Cr_2O_3 с небольшим количеством примесей водорастворимых солей — пигмент темно-зеленого цвета. Он устойчив к воздействию щелочей, кислот и повышенных температур. Получают путем нагревания смеси хромпика ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) с каким-либо восстановителем, например древесным углем.

Зелень цинковая представляет собой смесь желтого цинкового хрома с малярной лазурью и наполнителем (BaSO_4). Она устойчива к действию щелочей, обладает атмосферостойкостью и антикоррозионными свойствами. Широко используется в масляных красочных составах по металлу и дереву.

Зелень свинцовая хромовая — механическая смесь желтого крона с лазурью и наполнителями. По основным свойствам этот пигмент сходен с желтым свинцовым кроном. Как и свинцовые кроны, зелень свинцовая хромовая обладает высокой укрывистостью, красящей способностью и антикоррозионными свойствами. Широко используют ее в масляных красочных составах, однако вследствие разрушения пигмента в щелочной среде она не пригодна для красочных составов по известковой штукатурке и цементным растворам.

Металлические порошки применяют в красочных составах главным образом для декоративной отделки по металлу. В качестве таких порошков используют алюминиевую пудру и пудру золотистую.

Пудра алюминиевая — чешуйчатый, тонкодисперсный порошок серебристого цвета. Благодаря способности хорошо отражать солнечные лучи, она широко используется для окраски различных емкостей, нагревание которых под воздействием солнца нежелательно. Алюминиевая пудра имеет укрывистость 10 г/м^2 , плотность $2,5\text{—}2,6 \text{ г/см}^3$. Ее добавляют к лакам перед использованием.

Значительно реже применяют в строительстве *органические пигменты* вследствие меньшей (по сравнению с неорганическим) светостойкостью и химической стойкостью. В красочных составах обычно используют черные пигменты (нигрозин), синие (индантрен), красные (литольшарлах) и др.

16.4. ОСНОВНЫЕ РАЗНОВИДНОСТИ КРАСОЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Красочные вещества в зависимости от связующего компонента разделяют на масляные краски; лаки; эмалевые и эмульсионные краски; полимерные, полимерцементные и водоразбавляемые красочные вещества.

Масляные красочные вещества представляют собой суспензии пигментов, иногда с наполнителями, в олифе. Их получают путем тщательного перетирания пигментов в натуральной или искусственной олифе на специальных краскотерочных машинах. Промышленность вырабатывает масляные краски двух типов: густотертые, требующие перед употреблением разбавления олифой, и готовые к употреблению. Густотертые краски содержат минимальное количество олифы — 12—20%, а готовые к употреблению красочные вещества — 30—50% (по массе). Масляные краски применяют с учетом вида олифы, пигмента, их стоимости и атмосферостойкости. Наибольшей атмосферостойкостью обладают краски, приготовленные на натуральной олифе. Однако краски на искусственных олифах значительно дешевле, хотя и имеют меньшую долговечность. В этой связи составы на искусственных олифах более экономичны для производства внутренних отделочных работ.

Масляные краски на олифах из растительных масел применяют наружной и внутренней окраски по металлу, дереву и просохшей штукатурке.

Лаками называют растворы синтетических или природных смол, битумов и других пленкообразующих веществ в летучих растворителях. После нанесения на обрабатываемую поверхность тонкого слоя лака растворитель испаряется, в результате чего образуется твердая, блестящая, часто прозрачная пленка. Кроме двух основных компонентов лаки содержат еще различные добавки — пластификатор, отвердитель и др., улучшающие свойства лакового покрытия.

В зависимости от пленкообразующих веществ и растворителей лаки разделяют на следующие виды.

Масляно-смоляные лаки — растворы алкидных или других синтетических полимеров (смол), модифицированные высыхающими маслами. Они широко применяются для наружной и внутренней отделки по дереву (мебель, деревянные полы и др.).

Смоляные лаки — растворы некоторых синтетических полимеров (смол) в органических растворителях. Значительное распространение в строительстве получили лаки на основе мочевиноформальдегидного полимера, перхлорвиниловых и поливинилхлоридных композиций. Так, например, лаки на основе мочевиноформальдегидного полимера применяют и для покрытия паркетных и дощатых полов, для отделки древесноволокнистых и древесностружечных плит. Перхлорвиниловые лаки широко используют для лакирования масляных покрытий для придания им большей долговечности.

Битумные (асфальтовые) лаки представляют собой растворы битумов в органических растворителях. Такие лаки образуют пленки черного цвета, обладают высокими антикоррозионными свойствами, атмосфере- и химической стойкостью. Для улучшения свойств битумного лака, снижения его хрупкости при отрицательных температурах в него часто вводят высыхающие растительные масла. Битумные лаки применяют для покрытия металлических конструкций и изделий санитарно-технического оборудования.

Спиртовые лаки и политуры состоят из синтетических полимеров, растворенных в спирте или смеси спирта с другими летучими растворителями. В отличие от лаков политуры имеют в своем составе значительно больше растворителя. Лаки и политуры применяют для отделки изделий из дерева, стекла и металлов.

Нитроцеллюлозные лаки (нитролаки) представляют собой растворы нитроцеллюлозы совместно с пластификатором в органических растворителях. Эти лаки быстро отвердевают, образуя блестящую поверхность пленки коричневого цвета. Их применяют для лакирования мебели и различных изделий из древесины. Нитролаки огнеопасны и при

высыхании выделяют вредные пары растворителя. При производстве работ следует тщательно соблюдать установленные правила охраны труда.

Силиконовые кремнийорганические лаки получают на основе кремнийорганических полимеров, часто модифицированных другими высокомолекулярными веществами. Они отличаются повышенной температурной устойчивостью и способностью выдерживать кратковременное воздействие высоких температур (до 500°C). Их применяют обычно для окраски дымовых труб, печей и других сооружений, испытывающих при эксплуатации повышенные температуры.

Раствор резального фенолоформальдегидного полимера (бакелитовый лак) широко применяют для защиты сооружений от коррозии. *Эмалевыми красками* (эмалями) называют красочные вещества, получаемые путем тщательного смешения лака с пигментом. В качестве пигментов для эмалевых красок используют цинковые или титановые белила, кроны различного колера, ультрамарин, железный сурик и некоторые органические пигменты. Эмалц разделяют на масляные, приготовленные на масляных лаках; нитроэмали — на нитролаках; глифталевые — на глифталевых лаках и др. (перхлор-виниловые, алкидно-стирольные, эфиры целлюлозы). Поскольку пленки эмалевых красок при продолжительном воздействии влаги постепенно разрушаются, эмали применяют главным образом для отделки поверхностей внутри помещений с нормальным влажностным режимом.

На основе кремнийорганических полимеров получают эмали КО-174, представляющие собой суспензию пигментов и наполнителей в кремнийорганическом лаке. Эти эмали выпускают различного колера и используют для декоративных покрытий.

Строительные эмали на глифталевой основе используют для внутренних отделочных работ по дереву и штукатурке. Нитроглифталевые эмали применяют для внутренней и наружной покраски.

Перхлорвиниловые лаки и эмалевые краски — водостойки и их используют в основном для наружных малярных работ. Их выпускают в виде дисперсии полимера в растворителе. Для получения защитного лакокрасочного покрытия наносят 8—10 слоев эмали.

Эпоксидные эмали получают на основе эпоксидного полимера и органических растворителей (ацетона, толуола и др.). Применяют для защиты металлических конструкций.

В настоящее время защита конструкций и сооружений органическими лакокрасочными покрытиями находит все более широкое применение вследствие простоты выполнения и относительной экономичности работ. Но используют также и неорганические связующие вещества.

К водоразбавляемым красочным веществам следует отнести водо-известковые и водо-цементные краски, силикатные краски, водо-клеевые и казенно-клеевые составы. Эти краски изготавливают обычно на месте работ путем разбавления водой неорганических веществ до малярной консистенции.

Водо-известковые краски готовят с использованием воздушной или гидравлической извести и щелочестойких пигментов. Для предотвращения чрезмерно быстрого высыхания пленки в состав краски вводят хлористые соли (поваренную соль). Красочная пленка образуется благодаря процессу карбонизации извести. Эти краски не обладают долговечностью, однако они широко используются в строительстве благодаря их относительной дешевизне и простоте нанесения на покрытия. Известковые красочные составы применяют главным образом для окраски кирпичных стен, штукатурок, бетонных поверхностей и внутренней отделки некоторых промышленных зданий и сооружений.

Цементные краски являются более атмосфероустойчивыми (по сравнению с известковыми). В их состав входят белый портландцемент, известь-пушонка, щелочестойкий пигмент и некоторые другие компоненты, например хлористый кальций, стеарат кальция и гидрофобизирующие добавки, повышающие водостойкость краски. Образование прочной пленки красочного вещества обусловлено гидратацией цемента и

затвердеванием суспензии. Такие краски готовят на заводе и в сухом виде доставляют на место работ. Перед употреблением их разбавляют водой до малярной консистенции. Применяют для отделки фасадов зданий и стен внутренних помещений (бетонных, кирпичных, оштукатуренных) с повышенным влажностным режимом эксплуатации.

Клеевые краски представляют собой суспензии пигмента и наполнителей (мел) в водном коллоидном растворе малярного клея. Их приготавливают обычно на месте работ. Клеевые краски наносят на хорошо подготовленную, загрунтованную поверхность. Они не водостойки и поэтому их применяют для окраски стен и потолков сухих помещений.

Для приготовления казенно-клеевых, красочных составов используют сухие смеси, состоящие из измельченного казеина, извести-пушонки, щелочестойкого пигмента и некоторых добавок. Перед употреблением на месте работ сухие смеси смешивают с горячей водой. Казенно-клеевые краски являются более прочными и водостойкими, чем обычные составы на основе животных клеев. Их используют для окраски наружных оштукатуренных стен и отделки внутри помещений.

Силикатные краски представляют собой смеси из растворимого калиевого стекла, щелочестойких пигментов и наполнителей (мела, талька, диатомита, трепела и др.). Их приготавливают на заводах в виде густотертых цветных паст или сухих смесей, состоящих из наполнителей и пигмента. Перед началом работ пасты разбавляют водой до малярной консистенции, а сухие краски смешивают с растворимым калиевым стеклом. Пленка силикатной краски становится прочной и малорастворимой в воде вследствие гидролиза силиката калия и образования нерастворимых силикатов кальция и водного кремнезема. В силикатные краски вводят щелочестойкие пигменты.

Пленкообразующее вещество — силикат калия (K_2SiO_3) — подвергается гидролизу $K_2SiO_3 + 3H_2O = 2KOH + SiO_2 \cdot 2H_2O$. Образовавшийся гидрат кремнезема обладает также вяжущими свойствами, а едкая щелочь связывается наполнителем — диатомитом или трепелом: $2KOH + mSiO_2 = K_2O \cdot mSiO_2 + H_2O$.

Силикатные краски достаточно атмосферостойкие и используются для окраски фасадов зданий. Наиболее атмосферостойкие красочные покрытия получаются при окраске поверхностей свежего цементного бетона, содержащего свободную гидроксильную группу кальция, а также цементной и известковой штукатурки. Силикатными красками окрашивают деревянные конструкции и изделия для защиты древесины от возгорания.

16 5. АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА ПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Благодаря высокой химической стойкости полимерные материалы широко применяют для антикоррозионной защиты строительных конструкций и изделий из металла, железобетона, известковой и цементно-известковой штукатурки и др.

Распространенным способом защиты строительных материалов от коррозии является нанесение на защищаемую поверхность (окраской или напылением) некоторых полимерных композиций. Для устройства защитных покрытий часто используют лакокрасочные материалы, содержащие дисперсии пленкообразующих полимеров или сополимеров, в которых дисперсионной средой является вода (латексные краски). В качестве пленкообразующих компонентов применяют: поливинилацетат, сополимеры стирола с бутадиеном,⁸ эпоксидные полимеры и др.

Эмульсионные (латексные) краски особенно рекомендуются для покрытия известковой или известково-цементной штукатурки, древесностружечных и древесноволокнистых плит в помещениях кинотеатров, вокзалов, клубов и других помещений гражданских зданий. Такие красочные композиции, кроме главного пленкообразующего компонента, содержат добавки пластификаторов, стабилизатора и пигмента. Защитные полимерные покрытия наносят на обрабатываемую поверхность кистью или под давлением с помощью пистолета-распылителя. Наряду с водно-эмульсионными красками для антикоррозионной защиты используют и другие лакокрасочные полимерные материалы.

Защита наружных стен промышленных и гражданских зданий от увлажнения имеет большое значение для повышения их долговечности. В этой связи обработка наружных стен зданий силиконовыми веществами в значительной степени решает эту проблему. Так, например, обработка кирпичных и оштукатуренных стен силиконовыми материалами придает кладке гидрофобные свойства, защищает ее от коррозии и в то же время сохраняет их способность «дышать».

Для этой цели чаще всего используют водный раствор метилси-лконата натрия или калия, а также растворы силиконов в органических растворителях. При обработке силиконовыми композициями в кирпичной кладке или штукатурке происходит химическое взаимодействие метилсиликоната с углекислотой из воздуха. В результате химической реакции образуются (наряду с углекислым натрием или калием) метилсиликоновые полимерные соединения, не растворимые в воде и придающие гидрофобные свойства обработанным материалам. Для обработки кирпичной кладки, оштукатуренной стены или бетона метилсиликонат натрия или калия готовят в виде водного раствора (0,3—5,0%) и наносят на обрабатываемую поверхность кистью или распылением.

Весьма действенным способом защиты строительных конструкций и сооружений от коррозии является облицовка их полимерными материалами. Высокая химическая стойкость такой облицовки в значительной степени повышает долговечность резервуаров, ванн и трубопроводов, работающих в агрессивных средах. Для этой цели используют, в основном, листы и пленки из поливинилхлорида и полиэтилена. Применяют также полипропиленовые композиции, которые наносят с помощью пистолета-распылителя. В качестве облицовочных полимерных материалов для защиты от коррозии применяют и стеклопластики в виде гладких или волнистых листов.

Одним из способов антикоррозионной защиты металлических изделий с одновременным приданием им красивого внешнего вида является погружение их (после нагревания до температуры 120—140°C) в полимерную композицию, находящуюся в порошкообразном состоянии. При погружении обрабатываемых изделий в ванну с порошкообразным поливинилхлоридом или полиэтиленом полимер расплавляется и плотно сцепляется с поверхностью металла, образуя антикоррозионное и декоративное покрытие заданного колера.

При эксплуатации полимерных антикоррозионных покрытий в них могут происходить процессы диффузии агрессивных сред, набухание до растворения и химические реакции. Эти процессы деструкции идут, как правило, одновременно в различных сочетаниях и приводят к изменению физико-механических свойств полимерных покрытий. Значительное влияние на изменение свойств полимерных материалов и их старение оказывает воздействие агрессии при напряженном состоянии защитного покрытия. Установлено, например, что в условиях одновременного воздействия агрессивной среды и механического напряжения на поверхности полимерных материалов возникают микротрещины, которые затем постепенно возрастают. В то же время полимерные покрытия положительно зарекомендовали себя в строительстве как антикоррозионные материалы.

16.6. ОБОИ ДЛЯ ОТДЕЛКИ СТЕН

Выбор обоев для отделки стен помещений занимает важное место в отделочных работах. Наибольшее распространение нашли *бумажные и дуплексные обои* — гладкие и рельефные, с рисунком и без него, обои под их окрашивание; для нежилых помещений — вспененные обои двухслойные, состоящие из нижнего бумажного слоя и верхнего — из специального состава, который после тепловой обработки образует рельеф; для ванной комнаты — моющиеся и сильно моющиеся.

Другая разновидность обоев — *виниловые*: на бумажную основу нанесен слой винила, применяются для отделки кухонь, ванных, туалетов, прихожих. Обои типа *шелкографии* используют для интерьеров элитных квартир и кабинетов; в них нижний слой — бумажная основа, верхний — винил с шелковыми нитями или чистый винил в темных тонах; выпускают гладкие или рельефные обои. *Текстильные обои* — устойчивы к солнечному облучению, переносят чистку пылесосом, обладают звуко- и теплоизолирующими свойствами. Они являются бумажным полотном, пронизанным нитями из натуральных или специальных волокон. Эти обои могут быть также из вискозы, вспененного полипропилена, натуральной ткани (джутовые обои). Наклеивают специальным клеем. *Обои из стеклоткани* на бумажной подложке, которые обязательно окрашивают латексными или вододисперсионными красками, используют для отделки нежилых и производственных помещений.

Обои «жидкие» выпускают в жидком виде или в виде сухого порошка, который разводят вододисперсионной краской в соотношении 1:2 по массе. Обои накатывают валиком в два слоя, дают рельефное покрытие без швов. С помощью колеровочных красок или блестков придают стенам яркость. Используют для отделки стен и потолков нежилых помещений и офисов. *Обои с древесным волокном* — между двумя слоями бумаги запрессовывают древесные стружки, причем верхний слой пропитывают специальным водоотталкивающим веществом и окрашивают. Они являются звуко- и теплоизоляторами. Используют для отделки нежилых помещений, кухонь, прихожих, туалетов. *Структурные обои* под окраску — экологически чистые, скрывают дефекты поверхности, имеют стабильный рельеф рисунка, водостойчивые.

2. ОБЖИГОВЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ КОНГЛОМЕРАТЫ

Подобно безобжиговым обжиговые тоже состоят из двух взаимосвязанных структурных элементов — вяжущего вещества, выполняющего функции цементирующего матричного компонента (нередко именуемого «цементом высоких температур»), и заполняющего компонента. Далее также следуют сходные признаки структур этих двух искусственных, конгломератных по своей структуре, материалов. Как и в безобжиговых, вяжущая часть как матрица, являясь, как правило, жидким расплавом в технологический период, обладает гетерогенной микроструктурой с постепенным или быстрым отверждением при охлаждении за счет кристаллизации и аморфизации первичных и вторичных новообразований на стадии припекания и спекания, объемной и поверхностной диффузии, усадки и ползучести при локальном внешнем давлении. На последних стадиях отверждения происходит омоноличивание сформировавшихся изделий. Ниже рассмотрены основные разновидности обжиговых материалов — керамических, стекломассовых, шлаковых и каменного литья, а также металлических изделий.

Глава 17

Керамические материалы и изделия

17.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Керамическими называют материалы и изделия (ИСК), получаемые из порошкообразных веществ различными способами и подвергаемые в технологический период обязательной термической обработке при высоких температурах для упрочнения и получения камневидного состояния. Такая обработка называется обжигом. Из сырьевых порошкообразных материалов преимущественное применение при производстве строительной керамики имеет глина. Она большей частью содержит примеси, влияющие на ее цвет и термические свойства. Наименьшее количество примесей содержит глина с высоким содержанием минерала каолинита и потому называемая каолином, имеющая практически белый цвет. Кроме каолиновых глин разных цветов и оттенков применяют монтмориллонитовые, гидрослюдистые и др. Кроме глины, к применяемым порошкообразным материалам, являющимся главными компонентами керамических изделий, относятся также некоторые другие минеральные вещества природного происхождения — кварциты, магнезиты, хромистые железняки и др. Для изготовления технической керамики (чаще именуемой специальной) используют искусственно получаемые специальной очисткой порошки в виде чистых оксидов, например оксиды алюминия, магния, кальция, диоксиды циркония, тория и др. Они позволяют получать изделия с высокими температурами плавления (до 2500—3000°C и выше), что имеет важное значение в реактивной технике, радиотехнической керамике и т. п. Материалы высшей огнеупорности изготовляют на основе карбидов, нитридов, боридов, силицидов, сульфидов и других соединений металлов, т. е. безглинистых сырьевых веществ. Некоторые из них имеют температуры плавления до 3300—4000°C, особенно из группы карбидов.

Большой практический интерес имеют керметы, состоящие обычно из металлической и керамической частей с соответствующими свойствами. Получили признание огнеупоры переменного состава. У этих материалов одна поверхность представлена чистым тугоплавким металлом, например вольфрамом, другая — огнеупорным керамическим материалом, например оксидом бериллия. Между поверхностями в поперечном сечении состав постепенно изменяется, что повышает стойкость материала к тепловому удару.

Для строительной керамики, как отмечено выше, вполне пригодна глина, которая является распространенным в природе, дешевым и хорошо изученным сырьем. В сочетании с некоторыми добавочными материалами из нее получают в керамической промышленности разнообразные изделия и в широком ассортименте. Их классифицируют по ряду признаков. По конструкционному назначению выделяют изделия стеновые, фасадные, для пола, отделочные, для перекрытий, кровельные изделия, санитарно-технические изделия, дорожные материалы и изделия, для подземных коммуникаций, огнеупорные изделия, теплоизоляционные материалы и изделия, химически стойкую керамику.

По структурному признаку все изделия разделяют на две группы: пористые и плотные. К пористым условно относятся те изделия, которые показывают водопоглощение свыше 5% по массе: кирпич обыкновенный, черепица, дренажные трубы и др. Плотными принимают изделия с водопоглощением меньше 5% по массе, и они практически водонепроницаемые, например плитки для пола, канализационные трубы, кислотоупорные кирпич и плитки, дорожный кирпич, санитарный фарфор. Абсолютно плотных керамических изделий не имеется, так как испаряющаяся вода затворения, вводимая в глиняное тесто, всегда оставляет некоторое количество микро- и макропор.

По температуре плавления керамические изделия и исходные глины разделяются на легкоплавкие (с температурой плавления ниже 1350°C), тугоплавкие (с температурой плавления 1350—1580 °C) и огнеупорные (с температурой плавления выше 1580°C). Выше отмечались также примеры изделий и сырья высшей огнеупорности (с температурой плавления 2000—4000°C), используемых для технических (специальных) целей.

Отличительная особенность всех керамических изделий и материалов состоит в их сравнительно высокой прочности, малой деформативности. Хрупкость чаще всего относится к отрицательным свойствам строительной керамики. Она обладает высокой химической стойкостью и долговечностью, а форма и размеры изделий из керамики обычно соответствуют установленным стандартам или техническим условиям.

17.2. ГЛИНА — ОСНОВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Для производства строительной керамики применяют глины как относительно пластичный компонент и добавочные вещества — непластичные компоненты сырьевой смеси. Глина является главным структурообразующим веществом, создающим при обжиге изделий микро- и макроструктуру керамического конгломерата в виде различных изделий. Добавочные вещества вводят в глину (смеси) с целью повышения или снижения ее пластичности, что важно при формовании изделий; для увеличения пористости легких керамических изделий (порообразующие добавки); для снижения температуры обжига изделий (легкоплавкие добавки, или плавни).

Глины (см. гл. 8) состоят из мельчайших (менее 0,01—0,001 мм) частиц глинистых минералов, образовавшихся главным образом в процессах химического выветривания магматических и некоторых других пород. Пригодность глин для производства керамических изделий оценивается их химическим и минеральным составами и свойствами.

Химический состав глин характеризуют обычно содержанием оксидов (в процентах по массе). Главными и обязательными оксидами, составляющими различные глины, являются кремнезем SiO_2 (от 40 до 70%) и глинозем Al_2O_3 (от 15 до 35%). Постоянными компонентами глин являются также K_2O и Na_2O (вместе 1—15%), химически связанная H_2O (около 5—15%).

Часто присутствует Fe_2O_3 (0—7%). Встречаются в глинах и другие соединения, например TiO_2 , MgO , карбонаты Ca и Mg , органические примеси. В каолиновых глинах содержание глинозема и кремнезема почти одинаково, тогда как в монтмориллонитовых и магнезиальных возрастает количество кремнезема за счет снижения содержания глинозема. Резкое возрастание кремнезема обычно обусловливается присутствием песчаной примеси в глинах. С увеличением содержания Al_2O_3 повышаются пластичность и огнеупорность глин, а с повышением содержания кремнезема пластичность глин снижается, увеличивается пористость, снижается прочность обожженных изделий. Присутствие оксидов железа (и закиси) тонкодисперсных карбонатов CaCO_3 и MgCO_3 снижает огнеупорность глин, увеличивая усадку изделий. Наличие в глине щелочей ухудшает формуемость изделий, понижает огнеупорность и вызывает появление белых выцветов на изделиях.

Свойства глин имеют в керамическом производстве важное значение. Из физических свойств следует учитывать их пластичность, связующую способность, водопоглощаемость, воздушную и огневую усадки, огнеупорность, способность ионного обмена с окружающей средой и др.

Пластичность — способность влажной глины под действием внешних сил принимать заданную форму и сохранять ее после устранения давления. Ее можно увеличить вылеживанием глин на воздухе и снизить нагреванием (агрегированием тончайших частиц) или введением добавок, например кремнезема. К наиболее пластичным относятся монтмориллонитовые, а к наименее пластичным — каолиновые глины. С увеличением частиц размером меньше 0,001 мм пластичность глин возрастает.

Связующая способность глин выражается в том, что уплотненная влажная глина после высыхания не рассыпается, а сохраняет полученную форму, например изделия-сырца, для последующего обжига. Эта способность выражается также в том, что глина связывает зерна непластичных материалов, например песка или других минеральных крупных включений.

Водопоглощаемость некоторых глин достигает больших количеств, причем вода проникает не только по трещинам и капиллярам, но и между слоями в кристаллической решетке некоторых минералов, раздвигая их с эффектом набухания глины до 40% и более. Воздушная и огневая усадки отражают способность глин уменьшать объем при высыхании на воздухе или при обжиге. Большая усадка может нередко сопровождаться

образованием трещин, если глину не «отошчить», т. е. не добавить в нее кремнезем. Высокопластичные глины при высыхании дают до 10—15% воздушной усадки. При обжиге часть наиболее легкоплавких компонентов глины расплавляется, заполняя поры расплавом. Это приводит к сближению частиц и эффекту огневой усадки. Сумма воздушной и огневой усадок (полная усадка) колеблется до 18%.

Огнеупорность — важнейшее свойство глин выдерживать высокую температуру, не расплавляясь и не деформируясь.

Другой, более низкой является температура спекания глины, когда возникает заполнение пор расплавом, но без деформации изделия, а только с его уплотнением. Полностью спекшийся глиняный черепок имеет водопоглощаемость 2—5%. При нагревании выше температуры спекания количество расплава возрастает сверх объема пор и тогда наступает деформирование изделий с постепенным расплавлением всей массы. Интервал между температурами спекания и началом деформирования (оплавления) глины называется интервалом спекания (иногда — густоплавкостью). Чем больше этот интервал, тем спокойнее протекает обжиг и меньше опасность деформирования изделий при обжиге. Для получения плотного черепка необходимо, чтобы интервал спекания был не менее 100°C, для пористого — не менее 40—50°C. Огнеупорность зависит от химического и минерального составов глин. Присутствие каолинита всегда повышает степень огнеупорности, а даже небольшое количество в глине минералов — плавней — понижает температуру плавления.

Химический состав оказывает влияние на температуру плавления глин. Температура плавления оксидов сравнительно высока: SiO_2 — 1710°C, Al_2O_3 — 2050°C, MgO — 2800°C, Fe_2O_3 — 1548°C, FeO — 1380°C, TiO_2 — 1700°C и т. д. В глинах, однако, практически мало имеется химически чистых оксидов. Они находятся в химических соединениях в виде минералов, а при повышенных температурах создают, кроме того, эвтектические смеси, которые значительно снижают температуру плавления глинистых масс.

Способность ионного обмена с окружающей средой относится к важному свойству глин. Особенно легко замещаются катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , и анионы SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , NO_3^{1-} . Следует отметить, что тенденцией к ионному обмену обладают практически все минералы, если они переведены в тонкодисперсное состояние, так как на обломанных краях кристалликов заряды некоторых элементов становятся незамещенными. Возникают и неуравновешенные свободные заряды, например при замене Al^{3+} на Si^{4+} или Mg^{2+} на Al^{3+} , что также способствует ионному обмену. Замена катиона на другой приводит к изменению свойств глин — пластичности, водопроницаемости, густоплавкости и др.

Характерным свойством глин является их способность при обжиге превращаться в каменный материал.

Среди непластичных материалов, используемых в керамическом производстве в качестве добавок, — отошающие, выгорающие и плавни. К отошающим добавкам относятся кварцевые пески, пылевидный кварц (маршаллит), кремнь, шамот (обожженная глина и затем измельченная в порошок), золы ТЭС и др. К выгорающим добавкам относятся древесные опилки, торф, антрацит, каменный и бурый уголь, топливные шлаки и др., которые создают пористость после их выгорания при обжиге изделий и могут выполнять функции отошающей добавки (снижать пластичность). К плавням (флюсам) относят материалы, которые в процессе обжига взаимодействуют с глинистым веществом с образованием более легкоплавких соединений, чем чистое глинистое вещество. Среди них — полевые шпаты, пегматит, мел, доломит, руды с содержанием оксидов железа и др. Иногда в глину вводят специальные добавки, например с целью повышения кислотостойкости — песчаные смеси, затворенные жидким стеклом, для окрашивания изделий — оксиды металлов, для улучшения качества кирпича — пирофосфаты и полифосфаты натрия, для вспучивания — кокс и др.

17.3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕХНОЛОГИИ КЕРАМИКИ

Производство изделий строительной керамики состоит из следующих основных операций: добычи, транспортирования и хранения сырьевых материалов, их переработки и обогащения, приготовления керамических масс, формования сырца, сушки и обжига изделий.

Добывают сырье на карьерах экскаваторами, вывозят глину из карьера автосамосвалами, вагонетками и конвейерами (при небольшой удаленности карьера). Многие заводы имеют механизированные крытые глинохранилища. Непластичные материалы обычно поступают с карьеров необработанными и необогащенными. Подготовка сырьевых материалов состоит из разрушения природной структуры глины, удаления или измельчения крупных включений, измельчения и просеивания непластичных материалов и отделения от них железосодержащих и других вредных примесей, смешивания глины с добавками и увлажнения. Подготовка керамической массы осуществляют полусухим, сухим, пластическим и шликерным (мокрым) способами.

Полусухой способ применяют, если шихта содержит большое количество отошающих материалов, а пластичное сырье трудно поддается размоканию, переработке и смешиванию с непластичными материалами. Формовочную массу готовят в виде пресс-порошка влажностью 8—12%; формуют изделия в гидравлических или механических прессах с давлением штампа до 14,5 МПа (при производстве керамического кирпича) или 19,5—29,5 МПа (при производстве керамических плиток для полов). Производительность прессов при производстве кирпича равна до 7000—8000 шт. в 1 ч. Отпрессованный сырец поступает на обжиг в кольцевую или туннельную печь.

Способ полусухого прессования позволяет использовать малопластичные глины, сократить расход топлива на сушку сырца, снизить стоимость продукции. Однако процесс прессования сырца при этой технологии сложнее, чем на ленточных прессах, применяемых при пластическом прессовании, средняя плотность изделий несколько выше.

Сухой способ отличается от полусухого тем, что пресс-порошок имеет влажность 2—6%, полностью исключается сушка сырца. Применяют его для изготовления плотных изделий — клинкерного кирпича, плиток для пола, фаянсовых изделий и др.

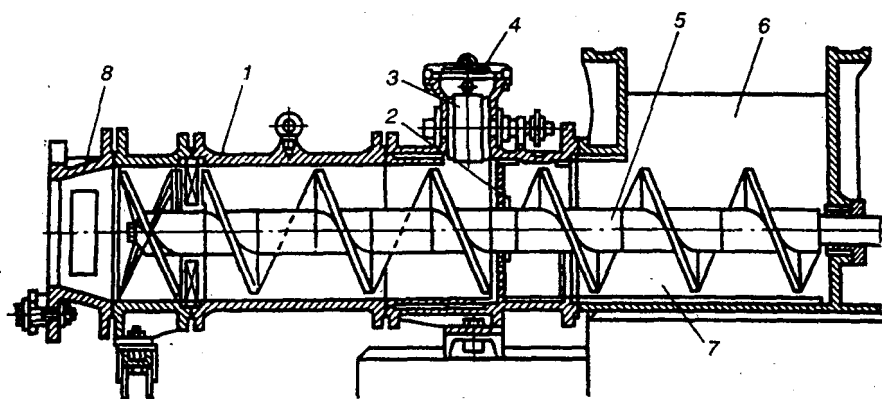


Рис. 17.1. Схема устройства ленточного вакуум-пресса "Кема":

1 — главный цилиндр пресса; 2 — перфорированная решетка; 3 — вакуум-камера с герметической крышкой; 4 — смотровое окно; 5 — шнековый винт; 6 — загрузочная коробка; 7 — задний цилиндр пресса; 8 — коническая часть головки пресса

При *пластическом прессовании* глину освобождают от каменных включений, измельчают и смешивают с отошающими, а иногда и выгорающими добавками до образования однородной керамической массы. Для измельчения глины применяют вальцовые дробилки с гладкими вальцами, дезинтеграторные вальцы, бегуны и др. Приготавливают керамическую массу чаще всего в двухзальных глиномешалках, где ее увлажняют водой

или паром до формовочной влажности 18—23% и тщательно перемешивают. Подготовленную глиняную массу подают для формования в горизонтальный вакуумный или обычный безвакуумный ленточный пресс. При пластическом прессовании кирпича применяют вакуумирование глиняной массы, повышающее прочность отформованного сырца, что позволяет укладывать его при сушке в более высокие штабеля и полнее использовать объем сушилок, при этом уменьшается трещинообразование и улучшается качество изделий. Ленточные вакуум-прессы (рис. 17.1) состоят в основном из трех частей: подготавливающей, вакуумирующей и прессующей. Подготавливающая часть прессы (мешалка) находится или над прессующей частью, или на одной оси с ней. Шнек подготавливающей части прессы захватывает керамическую массу и проталкивает ее через перфорированную решетку 2 в вакуум-камеру 3, откуда освобожденная от воздуха глиняная масса, уплотненная шнековым винтом 5, продвигается к выходному отверстию мундштука, укрепленного на головке прессы. Выдавливаемый из мундштука прессы непрерывный глиняный брус разрезается на отдельные изделия-сырцы с помощью полуавтоматических и автоматических станков. После резки сырец укладывается на сушильные вагонетки автоматами-укладчиками.

Способ пластического формования кирпича наиболее распространен. Для получения пустотелого кирпича пластического прессования в мундштуки прессов устанавливают специальные приспособления _керны, позволяющие получать в сырце сквозные отверстия различной конфигурации, которые уменьшают массу и теплопроводность стен.

Перед обжигом сырец сушат до влажности 5—7%. Сушка может быть естественной в сушильных сараях или искусственной в сушилках периодического (камерные) или непрерывного действия (туннельные, конвейерные). Естественная сушка зависит от погоды и составляет до 15—20 сут. Для продления сушильного сезона устраивают навесы со стеклянной кровлей, вводят в керамическую массу электролиты, устанавливают переносные вентиляторы.

На современных кирпичных заводах сырец сушат в искусственных сушилках камерного или туннельного типа. Наиболее совершенными и производительными являются туннельные сушилки непрерывного действия, в которых горячий воздух или дымовые газы обжигательных печей движутся с одного конца туннеля к другому, а навстречу горячему потоку на вагонетках перемещается сырец. Таким образом, горячий теплоноситель встречает уже полностью высушенный сырец, что уменьшает трещинообразование и коробление. Длина туннельных сушилок до 25—35 м, продолжительность сушки в них — 16—24 ч. Суточная производительность одного туннеля емкостью 6000 шт. кирпича составляет до 12000 шт. высушенного сырца-кирпича.

После сушки сырец обжигают в печах.

При *шликерном способе* исходные материалы измельчают и смешивают с большим количеством воды (до 60%) до получения однородной массы — шликера. Изделия (умывальники, раковины, унитазы, плитка и др.) изготовляют методом литья в гипсовых формах из шликера влажностью 30—34% с последующей их сушкой и обжигом.

При производстве некоторых керамических изделий (трубы, плитки) вводят дополнительную операцию — глазурование. Глазурованные изделия имеют меньшее водопоглощение и водопроницаемость, большую долговечность. Глазури готовят из каолина, кварца, мела или мрамора, доломита, глины, полевых шпатов, углекислого бария, свинца и др. Они бывают прозрачными и глухими непрозрачными). Для окрашивания глазурей применяют оксиды металлов, силикаты, шпинели, бораты и др. Наносят глазури на высушенные или обожженные изделия разными способами — пульверизацией, окунанием изделий в глазурную суспензию, поливкой изделий этой суспензией, путем припудривания поверхностей сухим составом глазури и др. После нанесения глазурей изделия обжигают.

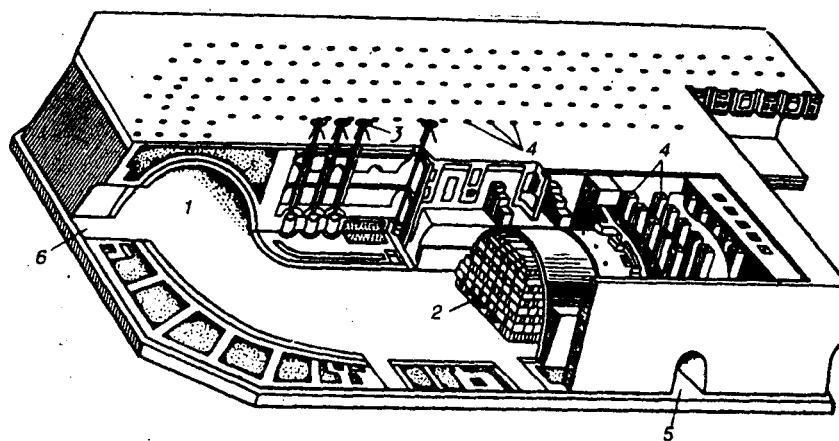


Рис. 17.2. Кольцевая печь (гофманская):

1 — канал печи; 2 — садка сырца; 3 — регулировка дымовых конусов; 4 — отверстия для засыпки топлива; 5 — канал для отвода газов; 6 — проем в печи для загрузки сырца и выгрузки кирпича

Обжиг керамических изделий ведется по специальному режиму: прогрев сырца, собственно обжиг и охлаждение готового изделия.

Кольцевая печь представляет собой замкнутый обжигательный канал длиной до 200 и высотой до 3 м и объемом от 300 до 2500 м³ (рис. 17.2). В наружной стене печи устроены проемы 6 — ходки для загрузки сырца и выгрузки кирпича. Ходки устраивают через 5—6 м, количество ходков зависит от количества условных камер печи, отделенных друг от друга бумажными щитами, устанавливаемыми при загрузке сырца. Число таких камер в кольцевой печи 12—36 шт. Сверху через топливные трубочки в своде камер загружают кусковое или пылевидное топливо; внизу камер имеются отверстия, соединенные с центральным дымовым каналом 5 для отвода дымовых газов. В кольцевой печи садка 2 сырца остается неподвижной до момента выгрузки готовых изделий, а зоны подогрева, обжига и охлаждения перемещаются по обжигательному каналу по мере продвижения подачи топлива от одной условной камеры к другой. При приближении зоны обжига бумажные щиты сгорают. У этих печей имеются недостатки: трудность загрузки и выгрузки кирпича при высоких температурах (до 800°C), неравномерное распределение температуры по высоте печи, что приводит к «недожогу» и «пережогу» — деформации изделий, поэтому кольцевые печи вытеснены туннельными.

Туннельная печь представляет собой обжигательный канал длиной до 160, высотой 1,7 и шириной до 3,1 м (рис. 17.3). Внутри этого канала по рельсам продвигаются вагонетки с обжигаемым сырцом. По длине канала печь разделяется на зоны подогрева, обжига и охлаждения. Вагонетки с сырцом сначала движутся навстречу горячим газам, а затем поступают в зону холодного воздуха, нагнетаемого газовым вентилятором. В свою очередь, дымосос, устанавливаемый в начале зоны подогрева, обеспечивает поступление горячего воздуха в зону обжига. В туннельных печах применяют твердое, жидкое или газообразное топливо.

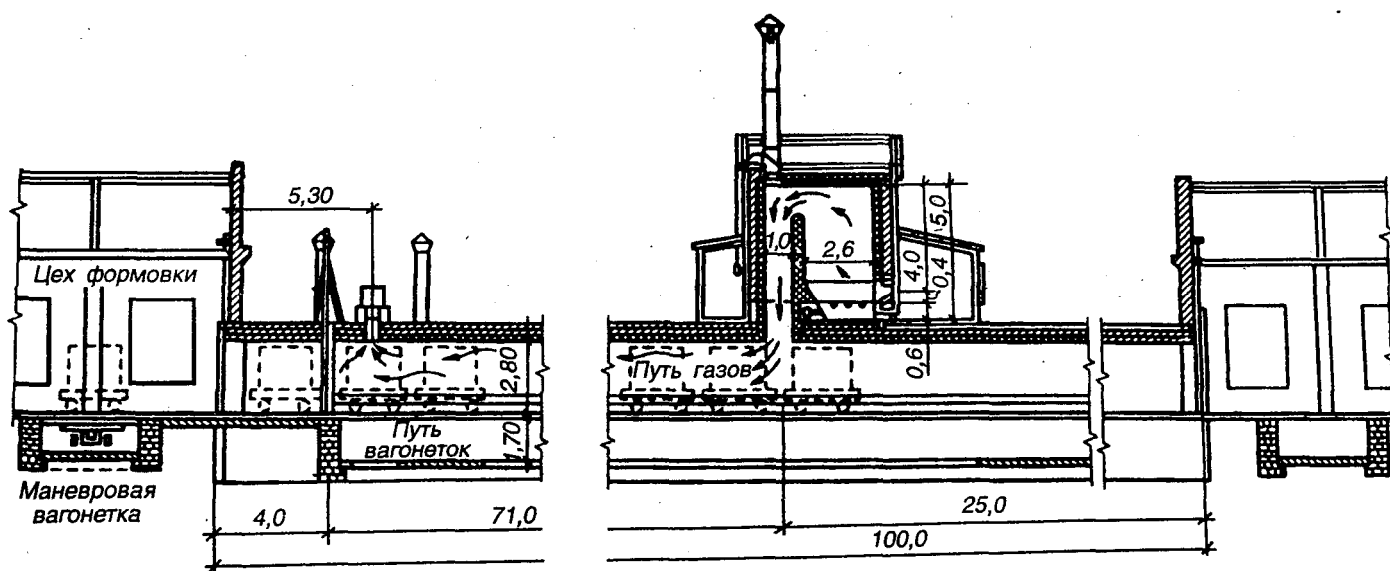


Рис. 17.3. Тоннельная печь — продольный разрез

Обжиг в этих печах идет значительно быстрее, чем в кольцевых. Трудоемкие процессы садки сырца на вагонетки и выгрузки изделий механизированы, режим обжига автоматизирован, качество изделий выше.

17.4. СТРУКТУРА И ПРИРОДА СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

При нагревании глинистой массы (или сырца), подготовленной определенным образом к термической обработке, до температур 110—250°C происходит испарение из различных глинообразующих минералов и пор изделия свободной и адсорбированной воды. В интервале температур 250—900°C происходит дегидратация, например каолинита в интервале температур 520—590°C, монтмориллонита и гидрослюд — при температурах 800—850°C. Этот процесс является эндотермическим и сопровождается небольшой усадкой обжигаемого сырья. Вместо кристаллического каолинита в сырье-изделии образуется аморфный метакаолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Примерно в этом же температурном интервале происходит диссоциация карбонатов с выделением CO_2 , сгорание органических примесей.

При дальнейшем нагревании дегидратированные соединения распадаются на первичные оксиды (глинозем, кремнезем и др.), в интервале температур 900—1250°C возникают в состоянии твердых фаз новые алюмосиликаты — неустойчивый силлиманит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, кристаллический муллит (типа природного) $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Содержание последнего возрастает с повышением температуры, а процесс муллитизации (рост количества муллита) сопровождается экзотермическим эффектом и усадкой с уплотнением расплава. Наиболее интенсивное образование муллита происходит в интервале температур 1000—1200°C. Процесс перекристаллизации силлиманита в муллит следует по реакции $3(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2) = 3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2$. Чем больше образуется новых соединений природного муллита, тем выше стойкость изделия к высоким температурам.

В результате последующего нагревания оставшийся свободный кремнезем из аморфного состояния переходит в кристаллическое с образованием кристобалита, возникает шпинель, например MgAl_2O_4 что сопровождается усадочными явлениями, а при температуре 1300°C и выше растворяется в стекле. При достижении критической температуры для данной системы сырьевая масса постепенно переходит в жидкое состояние, которое является расплавом и, кооме того содержит не полностью растворившиеся тугоплавкие минералы. В системе Al_2O_3 — SiO_2 наиболее низкоплавкой точкой (1595°C) служит эвтектика между кристобалитом и муллитом при содержании 94% SiO_2 (по массе). При других соотношениях этих оксидов в соединениях температура плавления от эвтектической быстро повышается, а у муллитов (28% SiO_2 по массе) составляет уже 1850°C. Между температурами 1595—1850°C твердый муллит находится в жидком расплаве. Присутствие плавней существенно уменьшает число сильных ионных связей кислорода с атомами металла и способствует образованию слабых — с атомами флюса и с понижением точки плавления.

Таким образом, химическое взаимодействие компонентов глинистой массы начинается еще на стадии твердых фаз, а с ростом температуры нагревания масса постепенно переходит в жидкое состояние. Керамический расплав состоит из большого количества простых и сложных соединений.

При охлаждении керамического расплава наиболее характерным процессом является кристаллизация, которая проявляется в выпадении первых сравнительно чистых от примесей кристаллов и их последующем росте. Чистые компоненты, обладающие наименьшей плавкостью (растворимостью), к которым относятся в глинистых веществах в первую очередь Al_2O_3 и SiO_2 , способны выделяться в виде кристаллов корунда и а-кристобалита при температурах соответственно 2050 и 1723°C. Ввиду наличия минеральных примесей

происходит быстрый процесс муллитизации, причем при температуре 1595°C образуется твердая эвтектика между кристобалитом и муллитом (рис. 17.4). Кристаллизация в полной мере пройти не успевает, так как при принятой скорости охлаждения большая или меньшая часть расплава с выпавшими в нем кристаллами становится переохлажденной жидкостью, т. е. стеклом.



Рис. 17.4. Диаграмма состояния расплавов

Дальнейшее охлаждение сопровождается переходом α -кристобалита в β -кристобалит, а затем в β -кварц и α -кварц. Присутствие плавней и других примесей может весьма значительно смещать в сторону меньших температур границы этих аллотропических видоизменений кремнезема.

В результате отвердевания расплава образуется микроконгломерат, в котором кристаллические зерна муллита, кремнезема разных модификаций, других видов веществ, кристаллизующихся при остывании (в основном алюмосиликатов), сцементированы аморфной массой отвердевшего расплава. Поскольку на более ранней технологической стадии расплав был или мог быть объединен с огнеупорным заполнителем, образовавшийся микроконгломерат — вязущее вещество — окаймляет отдельные зерна заполнителя и размещается в межзерновых пустотах. После охлаждения образуется обжиговый ИСК, в котором, кроме того, имеются контактные слои вязущей части с поверхностью заполнителя. Нередко при обжиге используются вспучивающиеся глины. Тогда структура керамики становится в той или иной мере пористой. Чем большей вспучиваемостью обладает сырье, тем больший объем пор и меньшая средняя плотность у соответствующего ИСК.

Типичная технология производства строительной керамики предусматривает обжиг изделий в печах до температуры спекания, при которой расплав частично или полностью заполняет поры и капилляры сырца, смачивая поверхность заполняющих или образующихся (например, кристаллический кремнезем) твердых частиц керамической смеси. При охлаждении расплава происходит процесс кристаллизации и остекловывания, который в получаемом обжиговом (до спекания) конгломерате выполняет функцию вязущего вещества — высокотемпературного цемента (по выражению А.А. Байкова). Огневая усадка глин составляет 2—8%.

В последнее время исследования (П.И. Боженов, Б.А. Григорьев и др.) показали, что при обжиге в условиях вакуума продолжительность обжига сокращается в несколько раз и при более низких температурах — на 100—150°C по сравнению с обжигом на воздухе. Обожженные в вакууме строительные конгломераты (кирпич, фаянсовые плиты и др.) имели повышенные показатели прочности, морозостойкости. Муллит образовывался при меньшей продолжительности изотермической выдержки, что благоприятствовало снижению энергозатрат (до 5%).

Сформировавшиеся микроструктуры керамического вязущего вещества, подобно вязущему безобжиговых конгломератов, представлены стекломассой, и кристаллическими фазами, которые цементируют остальную массу частиц изделия. При обжиге под вакуумом электротехнического фарфора была установлена изотропная кайма толщиной 0,5—1 мкм, окружавшая все зерна кварца. Кристаллическая фаза представлена муллитом $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ и другими новообразованиями, а также свободным кремнеземом в различных его аллотропических видоизменениях, некоторыми оксидами в

кристаллическом состоянии, не вступившими в химическое взаимодействие во время термической обработки сырья. Стекловатая, аморфная фаза (переохлажденная жидкость) вяжущей части представлена в микроструктуре легкоплавкими компонентами, которые не успели выкристаллизоваться при заданной скорости остывания расплава.

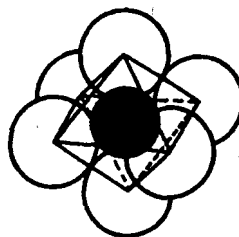


Рис. 17.5. Керамика как комбинация атомов металла и неметалла (обычно кислорода); пример оксида магния: белые шарики на рисунке — атомы кислорода (шесть), черные — атомы металла (магния), связи — ионные: атом металла отдает два электрона атому кислорода

Вяжущая часть в процессе обжига может быть подвергнута вспучиванию за счет введения соответствующих добавок с эффектом поризации микроструктуры.

Если микроструктуру керамики рассматривать на атомно-молекулярном уровне, то ее можно охарактеризовать как комбинацию атомов металла с атомами неметалла, чаще всего с кислородом. Как отмечает Д. Гальман, относительно большие атомы кислорода образуют матрицу, в которой маленькие атомы металлов (Al, Mg, Si и др.) помещаются в промежутках между ними (рис. 17.5), причем в кристаллах керамики превалируют ионные и в несколько меньшей мере — ковалентные связи. Эти прочные связи определяют прочность и стабильность, химическую стойкость и долговечность керамических материалов, что обусловлено, в частности, их высокоокисленным составом, т. е. большим содержанием кислорода.

Микроструктура керамики далека от совершенства, так как в кристаллических решетках имеются дефекты в виде вакансий или пор атомного размера, дефекты по границам контакта между кристаллами, деформации и поры, поэтому прочность керамики значительно уступает прочности идеальных кристаллов. Однако в целом керамика обладает комплексом высоких качественных показателей, который согласуется с определенным фазовым соотношением стекла и кристаллов, особенно при оптимальной структуре. Так, например, на рис. 17.6 приведены кривые изменения фазового состава и свойств керамических плиток, обожженных по скоростному режиму (по экспериментальным данным В.Ф. Павлова). Видно проявление закона створа применительно к этой разновидности керамических материалов.

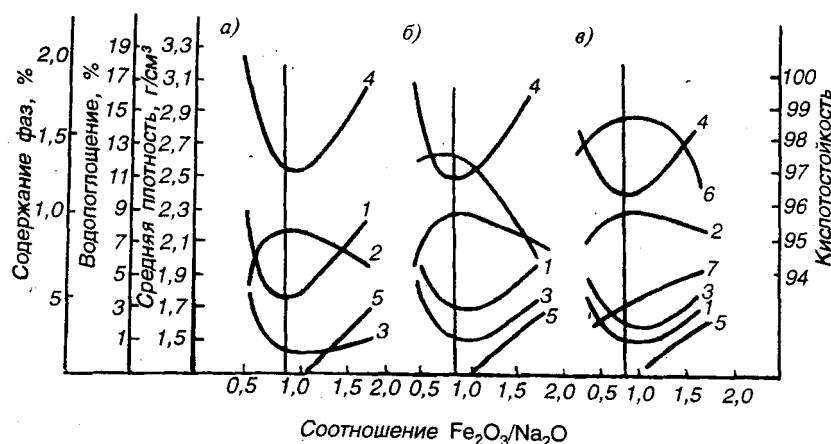


Рис. 17.6. Закон створа в отношении керамического сплава Fe_2O_3 и Na_2O в плиточных массах с добавкой стекол:

a — 1000°C; b — 1050°C; ϑ — 1 100°C; l — водопоглощаемость; 2 — кажущаяся плотность; 3 — содержание кристобалита; 4 — содержание кварца; 5 — содержание гематита; 6 — кислотостойкость; 7 — содержание муллита

Средняя плотность керамических материалов равна от 200 до 2300 кг/м³, предел прочности при сжатии $R_{сж} = 0,05 — 1000$ МПа, водопоглощение 0 — 70%, марки по морозостойкости: 15, 25, 35, 50, 75, 100, теплопроводность 0,07 — 1,16 Вт/(м·К).

17.5. КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

К изделиям и материалам строительной керамики относятся: стеновые — кирпич керамический рядовой полнотелый обыкновенный, кирпич керамический рядовой пустотелый, блоки пустотелые, панели из кирпича и другие; фасадные изделия, в том числе кирпич и камни лицевые, керамические плиты и плитки, ковровая керамика; изделия для внутренней облицовки стен: глазурованные плитки и фасонные детали к ним — карнизы, уголки, пояски; плитки для полов; изделия для перекрытий (балки, панели, специальные камни); кровельные изделия — черепица; санитарно-технические изделия — ванны, унитазы, умывальники; дорожные изделия — дорожный кирпич — клинкер; изделия для подземных коммуникаций — канализационные и дренажные трубы; огнеупорные изделия, применяемые для футеровки печей и других тепловых агрегатов; теплоизоляционные материалы — керамзит, аглопорит и др.; химически стойкая керамика — кирпич и плитки для футеровки химической аппаратуры. Высокие качественные показатели керамических изделий и материалов, широкая распространенность сырья и невысокая стоимость этой продукции способствовали большому объему их применения в строительстве. Выпуск керамического кирпича, например, составляет около половины объема производства стеновых материалов. Керамические облицовочные плитки служат основным отделочным материалом для ванн, санитарно-технических узлов и многих других помещений. Производство этих изделий возрастает из года в год, особенно эффективных кирпичей и камней, имеющих повышенную пористость и пустотность.

Стеновые материалы и изделия. Кирпич и камни керамические (рис. 17.7) изготавливают из глин, а также диатомитов, лессов и промышленных отходов с минеральными, органическими добавками или без них. Их применяют для кладки наружных и внутренних стен и других элементов зданий и для изготовления стеновых панелей (двух- и трехслойных) и блоков. Кирпич имеет размеры 250x120x65 мм, кирпич утолщенный 250x120x88 мм, кирпич модульный 288x138x65/85/, кирпич утолщенный — 250x120x85 мм. Камни выпускают следующих размеров — 250x138x138; 250x250x138; 250x250x120; 250x200x80 мм и др. Расположение пустот, их количество и размеры должны соответствовать стандартам. Кирпич может быть полнотелым или пустотелым, а камни — только пустотелыми.

Количество и форма пустот очень разнообразны. Поверхность граней нередко изготавливают рифленой, пустоты располагаются перпендикулярно или параллельно постели и могут быть сквозными или несквозными.

По средней плотности в сухом состоянии кирпич и камни подразделяют на три группы: а) эффективные, улучшающие теплотехнические свойства стен и позволяющие уменьшать их толщину по сравнению с толщиной стен, выполненных из обыкновенного кирпича. К этой группе относятся: кирпич со средней плотностью не более 1400 кг/м³ и камни — не более 1450 кг/м³; б) условно-эффективные, улучшающие теплотехнические свойства: кирпич и камни со средней плотностью 1450—1600 кг/м³; в) керамический кирпич со средней плотностью более 1600 кг/м³. Масса кирпичей и камней не должна превышать требуемую стандартами. Кирпич и камни имеют марки по прочности: 300, 250, 200, 175, 150, 125, 100, 75; марки по морозостойкости: Мрз 15, Мрз 25, Мрз 35, Мрз 50, Мрз 100. Водопоглощение кирпича должно быть не менее 6 и не более 16%. Для кладки малоэтажных домов прочность кирпича может быть сравнительно невысокой — М-100, М-150, так как прочность кладки на 60% зависит от качества (состава) раствора, его прочности (марок).

По точности размеров и внешнему виду они должны удовлетворять требованиям действующего ГОСТа. Недожог и пережог кирпича и камней не допускаются. Недожженный кирпич (алый) имеет недостаточные прочность и морозостойкость, а пережженный (железняк) — повышенные прочность и теплопроводность и искривленную

форму. Водопоглощение, по которому судят о пористости, должно быть для полнотелого кирпича не менее 8% по массе, для пустотелых изделий — не менее 16%.

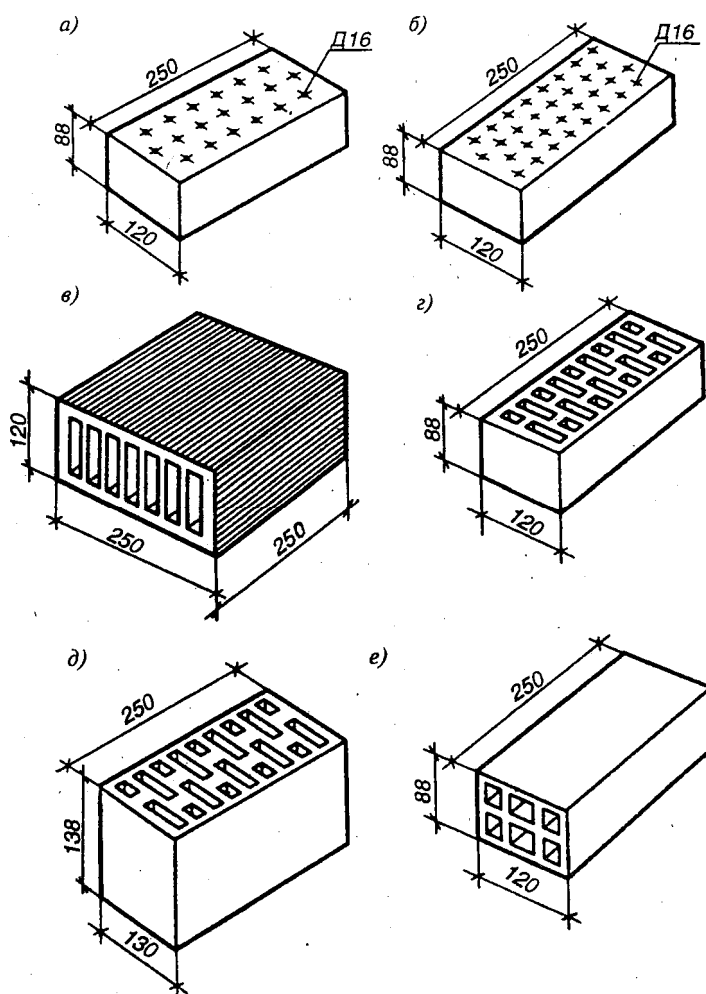


Рис. 17.7. Керамические изделия:

а — кирпич с 19 пустотами (пустотность 13%); б — кирпич с 32 пустотами (пустотность 22%); в — камень с 7 пустотами (пустотность 56%); г — кирпич с 18 пустотами (пустотность 27%); д — камень с 18 пустотами (пустотность 27%); е — кирпич с 6 горизонтальными пустотами (пустотность 42%)

Массу для пустотелого кирпича и камней обрабатывают более тщательно, формование желательно производить на вакуумных прессах со специальными приспособлениями (кернами) для образования отверстий (пустот). Не рекомендуется применять эти изделия для фундаментов, цоколей, стен мокрых помещений. Выпуск пустотелых кирпичей и камней приводит к экономии сырья и топлива, повышению производительности сушилок и печей, уменьшению транспортных расходов.

Кирпич и камни, изготовленные из диатомитов и трепелов (с добавками или без них), могут быть сплошными и пустотелыми, способы их формования — пластический или полусухой. По сравнению с обыкновенным глиняным кирпичом они имеют пониженную среднюю плотность (классов А и Б 1001—1300 кг/м³, класса В > 1301 кг/м³) и теплопроводность, что позволяет уменьшить толщину стен и снизить массу конструкций. Их применяют для кладки наружных и внутренних стен зданий и сооружений.

Полнотелый кирпич пластического прессования применяют при устройстве наружных и внутренних стен, полов, цоколей и фундаментов. Полнотелый кирпич полусухого прессования, пустотелые кирпич и камни не рекомендуется применять для устройства цоколей и фундаментов ниже уровня гидроизоляции.

Панели и блоки стеновые из кирпича и керамических камней применяют для устройства наружных и внутренних стен и перегородок в целях повышения индустриальности

строительства. Их изготавливают на специальных установках. Монтаж стен из них осуществляется с помощью крана, при этом время строительства сокращается до 40% по сравнению с продолжительностью возведения стен из кирпича, а себестоимость строительных работ уменьшается на 10—15%. Панели могут быть однослойными, изготавливаемыми из пустотелых керамических камней, двухслойными из кирпича на ребро (толщиной 120 мм) и утеплителя толщиной до 100 мм (плиты минераловатные, фибролит, пеностекло). Трехслойная панель состоит из двух кирпичных наружных слоев, каждый толщиной 65 мм, и в середине — утеплитель толщиной 100 мм. Общая толщина такой панели вместе с наружной и внутренней облицовками 280 мм. Для облицовки фасадных поверхностей панелей и блоков применяют лицевые кирпич и камни, плитки керамические глазурованные, а также декоративные растворы на белом портландцементе и растворы с добавлением крошки, получаемой дроблением горных пород.

Толщина панелей для внутренних стен и перегородок 80, 140, 180, 270 мм, а для блоков — 270 и 400 мм. При изготовлении этих панелей используют раствор марок не ниже 75, а для блоков — не ниже марки 50. Их армируют сетками из проволоки в горизонтальных швах и каркасами по периметру панелей и оконного проема, монтажные петли закладывают на всю высоту панели. После укладки материалы уплотняют вибрированием, далее отделывают поверхность и пропаривают в пропарочных камерах 8—14 ч.

Облицовочные изделия. Керамические облицовочные изделия применяют для наружной и внутренней облицовки в декоративных целях и для повышения долговечности конструкций. Для внешней облицовки зданий применяют кирпич и камни лицевые, крупноразмерные плиты, плитки керамические фасадные и ковры из них. Кирпич и камни лицевые укладывают вместе с кладкой стены. Они имеют ту же форму и размеры как у обычных, но должны отличаться более высокими качествами по внешнему виду, т. е. не иметь белесых потеков, быть однородными по цвету, не иметь на лицевой поверхности отколов, пятен, трещин и других дефектов. По пределам прочности при сжатии и при изгибе, по форме, размерам, средней плотности, водопоглощению они должны соответствовать требованиям ГОСТов. Они имеют марки по прочности 75, 100, 125, 150, 200, 250, 300, по морозостойкости — 25, 35, 50. Цвет их может быть естественным или окрашенным за счет ввода в сырьевые материалы добавок; с офактуренной лицевой поверхностью — торкретированием минеральной крошкой, ангобированием, глазурованием или двухслойным формованием. Двухслойные изделия изготавливают формованием из двух масс: красножгущихся глин и лицевого слоя толщиной 3—5 мм из светло-жгущихся окрашенных или неокрашенных глин. Лицевые кирпич и камни могут иметь гладкую офактуренную или рельефную лицевую поверхность, они одновременно служат и конструктивным несущим элементом наряду с обыкновенным кирпичом. Их применяют для облицовки фасадов зданий и сооружений, внутренних стен вестибюлей, лестничных стен клеток, переходов и т. п.

Крупноразмерные облицовочные плиты имеют квадратную или прямоугольную форму, длину 490, 990, 1190 мм, ширину 490 и 990 мм и толщину 9—10 мм. Они выпускаются одно- или многоцветными, глазурованными и неглазурованными, с гладкой или рельефной поверхностями. Водопоглощение их менее 1%, морозостойкость не менее 50 циклов. Такие плиты применяют для облицовки подземных переходов и фасадов зданий.

Плитки керамические фасадные и ковры из них. Плитки выпускают стеновые и цокольные, с глазурованной и неглазурованной лицевой поверхностью, с гладкой или с рельефной поверхностью разных цветов и размеров квадратной и прямоугольной формы (15 типоразмеров). Стеновые плитки имеют водопоглощение 2—9%, а цокольные 2—5%, морозостойкость соответственно не менее 40 и 50 циклов. Плитки, изготовленные из масс, содержащих шлаки, полиминеральные глины и карбонаты, должны иметь водопоглощение не более 12%. Плитки изготавливают пластическим или полусухим прессованием. Стеновые плитки предназначены для облицовки наружных поверхностей стеновых панелей, крупных блоков, для оформления архитектурных элементов зданий, а цокольные

— для облицовки цоколей зданий, подземных переходов и других строительных конструкций, находящихся в жестких условиях эксплуатации. Например, плитки типа «Кабанчик» размером 120х65х7 мм изготавливают из беложгущихся глин неглазурованными и глазурованными. Их также используют для отделки панелей (ковры) и для облицовки кирпичных стен.

Для изготовления ковров (одно- или разноцветных) применяют глазурованные или неглазурованные плитки площадью не более 115 см², а также бой плиток (брекчия) путем их наклеивания на оберточную или мешочную бумагу костным или другими клеями; ковры являются индустриальным типом керамических облицовочных материалов.

По согласованию с потребителем допускается изготавливать плитки и фасонные детали других размеров, не приведенных в ГОСТ.

Керамические плитки для внутренней облицовки стен могут быть квадратной, прямоугольной и фасонной формы — уголки для отделки внешних и внутренних углов, прямая карнизная плитка, уголки карнизные и др. Водопоглощение по массе < 16%, предел прочности при изгибе > 15 МПа. Плитки должны выдерживать перепады температур от 125(150)°С до 15—20°С без появления дефектов. Выпускается 50 типоразмеров плиток. Номинальная толщина плитки 5—8 мм. По согласованию с потребителем допускается изготавливать плитки и фасонные детали других размеров и формы. Плитки могут быть гладкими и рифлеными, их лицевая поверхность покрывается одноцветной (белой или цветной) глазурью. Белые и цветные плитки могут быть с одно- или многоцветным рисунком, нанесенным методом сериографии, декорирования, набрызгивания и др. Обратная сторона плиток делается рифленой, обеспечивающей надежное сцепление с раствором. Их изготавливают из каолиновых глин с добавкой песка и плавней (фаянсовые плитки), способом полусухого прессования.

Майоликовые плитки изготавливают из красножгущихся глин. Их широко применяют для внутренней облицовки стен плавательных бассейнов, ванных комнат, бань, прачечных, столовых, больничных и других помещений, магазинов, лабораторий, санузлов.

Плитки керамические для полов (метлахские) изготавливают из тугоплавких и огнеупорных глин с добавками или без них. Их обжигают до спекания для получения плотного черепка с водопоглощением не более 4%. Плитки выпускаются квадратными, треугольными, прямоугольными четырех-, пяти-, шести-, восьмигранными, фигурными (всего 30 типоразмеров). Толщина их 4—13 мм. Лицевая поверхность может быть гладкой, с рельефом и тиснением, матовой и глазурованной, одноцветной и многоцветной, с рисунком или без него. Их применяют для устройства декоративных полов, в помещениях, где имеет место интенсивное движение, воздействие агрессивных веществ, где необходимо поддерживать особую чистоту. Допускается выпускать плитки других размеров и форм (по согласованию с потребителем).

Для мозаичных (узорчатых) полов применяют плитки площадью не более 9000 мм². Их изготавливают из глиняной массы с окрашивающими примесями или без них. Для изготовления ковров эти плитки наклеивают на бумажную основу с размерами, согласованными с заказчиком.

Изделия для перекрытий и кровли. При устройстве перекрытий применяют пустотелые керамические камни для часторебристых перекрытий (сборных и монолитных), камни для накатов (заполнение между балками). Их изготавливают из глиняных масс средней пластичности путем пластического прессования. Пустотность керамических камней для перекрытий 50—75%, за счет чего перекрытия из них обладают хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, огнестойки, долговечны; для их устройства требуется небольшой расход стали и цемента.

Кровля из черепицы имеет хорошую долговечность (до 300 лет), недорога, декоративна, огнестойка. Черепицу широко применяют в странах Западной Европы. Однако кровля из нее является тяжелой и неиндустриальной. Кроме того, кровлю необходимо устраивать с

большим уклоном (более 30 градусов) для быстрого стока воды. Сырьем для черепицы служат легкоплавкие глины с добавками или без них.

Выпускают черепицу разных типов: пазовую штампованную, пазовую ленточную, плоскую ленточную, S-образную, коньковую и др. ГОСТом предъявляются требования к внешнему виду, прочности, морозостойкости (не менее 25 циклов), массе в насыщенном водой состоянии и др.

Санитарно-технические керамические изделия и трубы. Сырьем для изготовления санитарно-технических изделий (умывальников, раковин, унитазов, биде, сливных бачков и др.) служат каолин, пластичная беложгущаяся глина, полевой шпат, песок кварцевый, бой обожженный, жидкое стекло, сода. Санитарно-технические изделия бывают фарфоровыми, полуфарфоровыми, фаянсовыми. Изделия из фаянса имеют пористый черепок с водопоглощением $<12\%$ и $R_{сж} \approx 100$ МПа, из полуфарфора соответственно $<5\%$ и 150—200 МПа. Водопоглощение фарфора $<1\%$ и $R_{сж} = 400—500$ МПа. Сырье для производства санитарно-технических изделий подвергают тщательной переработке: помолу, отмучиванию, прессованию и др. Формуют их из шликеров — сметанообразных масс методом литья в гипсовых формах. Высушенные изделия покрывают белой или цветной глазурью и обжигают. После обжига глазурь придает изделиям блестящую поверхность и повышает стойкость их к действию агрессивных сред (кислот, щелочей), воды и перепадам температур. Изделия выпускают трех сортов.

Трубы керамические канализационные изготавливают из тугоплавких или огнеупорных глин без добавок или с отстающими добавками (тонкомолотым шамотом или кварцевым песком). Формуют их на специальных трубных прессах. На одном конце имеется раструб для соединения отдельных звеньев трубопровода. Трубы должны быть водонепроницаемыми и выдерживать внутреннее давление не менее 0,15 МПа. Длина труб 1000—1500 мм, внутренний диаметр 150—600 мм. Водопоглощение труб должно быть не более 7,5—8%, кислотостойкость $>93\%$. Их применяют для отвода сточных вод в агрессивных грунтах и для отвода сточных агрессивных жидкостей. Трубы на 1 м длины ствола должны выдерживать без разрушения внешнюю нагрузку не менее 20—35 кН. Трубы керамические дренажные изготавливают из пластичных глин с добавками или без них путем формования на специальных ленточных прессах. Они имеют наружную цилиндрическую, шести- и восьмигранную поверхность, длину 333 мм и внутренний диаметр 50—250 мм, морозостойкость должна быть >15 циклов, а разрушающая внешняя нагрузка 3,5—5 кН (в зависимости от диаметра труб). Снаружи трубы покрывают глазурью. Вода в такие трубы поступает через стыки. Применяют их в мелиоративном строительстве.

Керамические материалы и изделия специального назначения. *Клинкерный кирпич* выпускают размером 220x110x65 мм. Его получают из тугоплавких глин путем их обработки, формования, сушки и обжига до спекания, но без остекловывания поверхности. Марки кирпича по прочности 1000, 700 и 400, морозостойкость 100—500 циклов, водопоглощение не более 2—6%. Кирпич хорошо сопротивляется истиранию. Его применяют для устройства полов промышленных зданий, обмуровки канализационных коллекторов, для покрытия дорог, в качестве кислотостойкого материала.

Кирпич керамический лекальный изготавливают из глин с добавками или без них пластическим прессованием. При этом применяют лекальный мундштук с заданным радиусом кривизны. Он предназначен для кладки кирпичных и футеровки железобетонных промышленных дымовых труб при температуре нагрева кирпича не более 700°C. Водопоглощение его не менее 8%, марки по прочности — 30, 125, 150, морозостойкость — не ниже 15 циклов.

Кирпич керамический для дымовых труб изготавливают из того же сырья и применяют для тех же целей, что и лекальный. Он имеет размеры: длину 120 или 250 мм, ширину 120 или 250 мм, толщину 65 или 88 мм, прямоугольную или клинообразную форму. Может выпускаться клинообразный кирпич с меньшей длиной: 70, 100, 200 и 225 мм.

Морозостойкость этого кирпича — 25, 35, 50 циклов марки по прочности: 125, 150, 200, 250, 300, водопоглощение — не менее 6%. Не допускаются недожог и известковые включения в сырье, вызывающие дутики и разрушение кирпича.

Кислотоупорные керамические изделия имеют высокую плотность, водопоглощение не более 0,4—10%, $R_{сж}$ — не менее 35—150 МПа, кислотостойкость — не менее 95—99%, термическую стойкость — 2—15 теплосмен.

Кирпич кислотоупорный выпускают высокой и первой категории качества классов А, Б, В и четырех форм: прямой — КП, клиновой (торцовый — КТ и ребровый — КР), радиальный (поперечный — КРП и продольный — КРПР) и фасонный (слезник — КФ). Размеры кирпича прямого 230x113x65 мм. Эти изделия применяют для устройства фундаментов, футеровки химических аппаратов, кладки колосников, настилки полов, устройства сточных желобов предприятий химической промышленности.

Плитки кислотоупорные и термокислотоупорные керамические предназначаются для футеровки реакционных аппаратов, отбельных башен, емкостей, целлюлозно-варочных котлов, защиты строительных конструкций от кислотных сред. В зависимости от назначения они имеют разные марки и форму. Плитки производятся высшего и первого сортов шести марок: кислотоупорные фарфоровые — КФ, термокислотоупорные дунитовые — ТКД, термокислотоупорные для гидролизной промышленности — ТКГ, кислотоупорные для строительных конструкций — КС, кислотоупорные шамотные — КШ и термокислотоупорные шамотные ТКШ.

Трубы кислотоупорные керамические и фасонные части к ним предназначаются для устройства кислотопроводов и газопроводов. Они имеют плотный спекшийся черепок, с наружной и внутренней стороны их покрывают глазурью. Они должны выдерживать гидравлическое давление не менее 5 атм (0,5 МПа).

Огнеупорные материалы применяют при строительстве печей, топок и других аппаратов, работающих при высоких температурах, в виде кирпичей, фасонных изделий или блочных элементов. К ним предъявляются требования по прочности, огнеупорности, термостойкости (способности огнеупоров выдерживать без разрушения резкие колебания температуры), химической стойкости против воздействия различных газов, расплавленных металлов, шлаков, стекломассы. Их разделяют на огнеупорные с температурой плавления 1580—1770°C, высокоогнеупорные — 1770—2000°C и высшей огнеупорности с температурой плавления выше 2000°C. По пористости огнеупорные материалы бывают: особо плотными, высокоплотными, уплотненными, среднеплотными, низкоплотными, высокопористыми, ультрапористыми. По способу формования: пластично-формованными, прессованными, сухоформованными, горячепрессованными, плавленолитыми и неформованными (без определенной формы и размеров).

В зависимости от химико-минерального состава огнеупорные изделия подразделяются на кремнеземистые, алюмосиликатные, высокомагнезиальные, магнезиально-известковые, магнезиально-си-ликатные, углеродистые, карбидкремниевые, цирконистые, оксидные, бескислородные и др. Наибольшее распространение в строительстве получили кремнеземистые и алюмосиликатные огнеупоры. По применению они бывают: 1) общего назначения; 2) для определенных тепловых агрегатов и устройств.

К кремнеземистым огнеупорам относят динасовые, динасохромитовые и кварцевые изделия. Динас изготавливают из кварцитов или песчаников с введением в состав шихты от 1,5 до 2,5% минерализаторов (извести, железной окалины и др.). Смешивание измельченного кварцита с минерализатором, а также связующим органическим веществом (СДБ) и водой производят в смесительных бегунах. После формования сырец сушат и обжигают. Их применяют для кладки сводов и стен мартеновских, стекловаренных печей и других тепловых агрегатов. Их огнеупорность не ниже 1690—1710°C, $R_{сж} \geq 17,5—30$ Н/мм².

Кварцевые огнеупоры изготавливают из обогащенного кварцевого песка путем его плавки в специальных печах с последующим прессованием в виде брусьев. Последние применяют для кладки бассейнов стекловаренных печей.

Высокоогнеупорные карбидкремниевые изделия (на кремнеземистой, алюмосиликатной и нитридной связках) выпускают пяти марок: КК — карбидкремниевые на кремнеземистой связке; ККУ — карбидкремниевые на кремнеземистой связке улучшенные; КА — карбидкремниевые на алюмосиликатной связке; КАУ — то же, улучшенные; КН — карбидкремниевые на нитридной связке. Их $R_{сж} \geq 25\text{—}100 \text{ Н/мм}^2$, температура начала размягчения не ниже $1500\text{—}1700^\circ\text{C}$.

Алюмосиликатные (глиноземистые) огнеупоры изготавливают из измельченных кварцевых пород и шамота (наполнитель), а в качестве связки используют глину или каолин. После формования сырец сушат и обжигают. Изделия применяют для футеровки коксовых печей, вагранок и др. Огнеупорность изделий на каолиновой связке не ниже 1710°C , на глиняной — не ниже 1580°C .

Шамотные изделия формуют из керамических масс, изготовленных из огнеупорного шамота и огнеупорной глины (или смеси глины и каолина), с последующим обжигом. Производство их осуществляется пластическим или полусухим прессованием. Их огнеупорность — до 730°C , $R_{сж} > 13\text{—}23 \text{ Н/мм}^2$. Пористость шамотных изделий зависит в основном от вида применяемого шамота и его количества. Их применяют для футеровки вращающихся цементных печей, керамических печей, обмуровки топок паровых котлов.

Высокоглиноземистые огнеупоры изготавливают из высокоглиноземистого сырья (бокситов, диаспора, корунда и др.) обжигом до спекания или методом литья из расплава. Их огнеупорность до 2000°C ; применяют для кладки стекловаренных печей.

Кроме упомянутых в качестве огнеупорных употребляют изделия, в составе расплавленной шихты которых содержатся диоксид циркония, циркон и технический глинозем, а также магнезиальные, хромо-магнезиальные, шпинельные, доломитовые и другие огнеупоры.

Для получения *технической керамики высшей огнеупорности* применяют чистые оксиды (BeO , MgO , CaO , Al_2O_3 , ZrO_2 и др.). Изделия формуют методами прессования порошков, шликерным литьем, горячим литьем под давлением. Обжиг производят до спекания, поэтому керамический материал имеет плотный черепок с водопоглощением, равным нулю. Температура плавления керамики чистых оксидов $2000\text{—}2500^\circ\text{C}$.

За последние годы получены неокислородные огнеупорные материалы с температурами плавления до 4000°C . Для улучшения деформативных свойств изготавливают металлокерамику (керметы), которую получают путем обжига до спекания изделий из смеси керамического порошка с порошкообразным металлом. Керметы применяют для изготовления деталей оборудования, работающих при высоких температурах, и инструментов, обладающих высокой твердостью.

В тепловых агрегатах для уменьшения расхода топлива применяют *керамические теплоизоляционные изделия и огнеупорные легковесы*. Для их изготовления используют выгорающие добавки, газообразователи, вспениватели и другие порообразующие вещества. Изделия получают как из керамических масс с введением в них огнеупорных или тугоплавких пористых заполнителей, так и из поризованных керамических или огнеупорных масс без заполнителей. Отформованные из этих масс изделия сушат, а затем обжигают при высоких температурах. Теплоизоляционные изделия применяют при температурах до $900\text{—}1200^\circ\text{C}$, а огнеупорные легковесы до $1000\text{—}1650^\circ\text{C}$ и выше.

Теплоизоляционные изделия из трепелов (диатомитов) с пенообразующими или выгорающими добавками выпускают в виде кирпича, скорлуп и сегментов марок 350, 400, 500, 600 по средней плотности. Формование массы влажностью 50% производят на ленточном прессе, после сушки сырец обжигают. При температуре 350°C теплопроводность $\lambda \leq 0,116\text{—}0,168 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, при температуре 25°C $\lambda \leq 0,079\text{—}0,116 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Теплоизоляционные перлитокерамические изделия изготавливают из вспученного перлитового песка со средней плотностью до 80 кг/м^3 на основе керамофосфатного связующего, легкоплавких или огнеупорных глин. В состав шихты могут быть введены огнеупорные компоненты, например шамот и др. Получаемые легковесные перлитосодержащие огнеупоры используют при температуре до $1300\text{—}1500^\circ\text{C}$. Вермикулитокерамические изделия прессуют из массы, состоящей из вермикулита и бентонитовой глины с введением в нее пены, а иногда и асбеста. По способу ВНИИСТРОМа высушенную огнеупорную глину после помола смешивают с вспученным вермикулитом в соотношении 1:3, после чего вводят алюминиевую пудру. Полученную массу укладывают в форму, виброуплотняют, сушат и обжигают.

Используют также *волокнистые теплоизоляционные материалы* из различных видов волокон — кремнеземистых, кварцевых, каолиновых, а также стеклокристаллических (Al_2O_3 и ZrO_2).

В последнее время на рынке строительных материалов находит спрос высокопористый керамический «Редоксит», получаемый своеобразным «вспучиванием» сырья при обжиге. Из 1 м^3 исходной глины получают до 8 м^3 готовых изделий с изотропией свойств по всему объему. Используют «Редоксит» для отделки стеновых блоков и плит, внутренних перегородок, изоляции междуэтажных и чердачных перекрытий, постройки хозяйственных бытовых сооружений: складов, гаражей, ангаров и др.

Относительно новым строительным материалом является *керамический гранит*, получаемый из экологически чистых природных продуктов, тщательно очищаемых от посторонних примесей, с добавлением естественных оксидных пигментов 10—12 цветовых оттенков. Плиты прессуют при давлении 45 МПа, после формования — обжигают в вакуумных печах при температуре 1200°C .

По прочности, износостойкости, морозостойкости, твердости керамический гранит превосходит натуральный и не имеет радиационного фона, а по шкале Мооса его твердость равна 8.

Этот новый материал используют для отделки промышленных предприятий, торговых центров, аэропортов, облицовки стен в банках, гостиницах. Так, например, он был применен для отделки Инкомбанка, ГУМа, аэропортов «Шереметьево» и «Домодедово» и других объектов.

Стекланные и другие плавленные материалы и изделия**18.1. ЗНАЧЕНИЕ СТЕКЛЯННЫХ ИЗДЕЛИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

История стекла уходит в глубокую древность. Известно, например, что в Египте и Месопотамии умели делать стекло почти 6000 лет назад. В России первый стекольный завод был построен в 1638 г. недалеко от г. Воскресенска. Большой вклад в технологию стекла внесли отечественные ученые: М.В. Ломоносов, Д.И. Менделеев, К.Г. Лаксман, А.А. Лебедев, В.Е. Тищенко и др. В современном строительстве значительно расширилась область применения архитектурно-строительных изделий из стекла. Конструктивно-строительные элементы — стеклоблоки, стеклопрофилит и стекло-пакеты — являются эффективным светопрозрачным строительным материалом.

За последние годы освоено получение полированного стекла путем формования непрерывной ленты на расплаве металла; химической обработкой поверхностей получают сверхпрочное листовое стекло, которое примерно в 20 раз прочнее обычного и в несколько раз прочнее закаленного. В химической и пищевой промышленности широко применяют стеклянные трубы, двери из закаленного стекла. Вспениванием стекла получают пеностекло — эффективный теплоизоляционный материал, который хорошо поддается механической обработке. Из стекла вырабатывают прочные нити, из которых изготавливают ткани, а из последних в сочетании с полимерами — стеклопластики. Синтезированы стекла с избирательным светопропусканием, выпускаются прочные, долговечные стеклокристаллические материалы — ситаллы, создано электровакуумное стекло для СВЧ — приборов с повышенной химической устойчивостью. Освоена технология ионообменного упрочнения очковых стекол и ветровых стекол автомобилей. Разработана технология особо чистого кварцевого стекла (КС-4В), новая технология утолщенного стекла (8—30 мм). Новым направлением в стекольном материаловедении являются синтез и технология получения биоактивных материалов на основе стекла, ситаллов, керамики и других неорганических материалов для применения в хирургии, ортопедии, стоматологии.

18.2. СОСТАВ И СТРОЕНИЕ СТЕКОЛ

Стекла являются неорганическими аморфными термопластичными материалами (микроконгломератами), обладающими рядом специфических свойств. По своему строению и составу они представляют собой системы типа истинного затвердевшего раствора из химических соединений кислотных и основных оксидов. Имеется условное деление оксидов, входящих в стекло, на стеклообразователи и модификаторы. Оксиды SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 относятся к стеклообразующим, поскольку каждый из них в чистом виде может самостоятельно образовать стекло; например, при 100%-ном содержании SiO_2 можно получить кварцевое стекло, которое обладает наиболее высокой температурой размягчения (1250°C). Так называется температура, при которой абсолютная вязкость стекла составляет 10^7 — 10^8 Па·с. Введением оксидов-модификаторов (Na_2O , K_2O , CaO , BaO , MgO , PbO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Sb_2O_3 , ZnO и др.) существенно снижают температуру размягчения стекла и придают стеклу необходимые свойства.

Если главную стеклообразующую часть стекол составляет SiO_2 , тогда стекла называют силикатными. В зависимости от вида и содержания добавочных оксидов стекла называют алюмосиликатными, бороалюмосиликатными, алюмофосфатными и т. п. В строительстве в основном применяют силикатные стекла. Подбором химического состава стекла определяют смесь оксидов, называемую шихтой.

Для получения силикатного стекла шихту готовят из различных сырьевых материалов, содержащих необходимые оксиды: кварцевый песок, сода или сульфат натрия, поташ, известняк и мел, доломит, пегматит, каолин, полевого шпата и др. В малых количествах в составы вводят стеклянный бой, красители (оксиды меди, хрома, кобальта, марганца и др.), осветлители (триоксид мышьяка, селитру и др.), глушители и др. В последнее время используют отходы: доменные шлаки, кварцсодержащие материалы, тетраборат кальция и другие. Перемешивание измельченных компонентов в строго отдозированных количествах (согласно расчетам) производят в смесителях барабанного или тарельчатого типа. Готовую шихту загружают в ванную печь—бассейн, сложенный из огнеупорных брусев, или в горшковую печь. Бассейны больших ванн вмещают до 2500 т стекломассы — пластичного расплава шихты, образующегося при температуре свыше 1000°C .

При нагревании шихты до температуры 1100 — 1150°C происходят химические процессы силикатообразования, а при дальнейшем повышении температуры — стеклообразования. Шихта превращается в однородную (гомогенную) стекломассу, но со значительным содержанием в ней газовых включений (H_2O , CO_2 и др.). Осветление и дальнейшая гомогенизация стекломассы осуществляются при температуре 1500 — 1600°C , вязкость ее при этом уменьшается (до 10 Па·с), что облегчает удаление газовой фазы. Последний этап варки стекла — охлаждение (студка) стекломассы. Чем медленнее происходит охлаждение стекломассы, тем больше вероятность перехода ее в кристаллическое состояние; чем выше скорость охлаждения, тем более высокой температуре соответствует «замороженное» состояние структуры.

Практически формовка стекла, отобранного из печи, может производиться при вязкости его не менее 100 и не более 10^5 Па·с. К концу формовки вязкость может быть до 10^8 Па·с. У различных стекол зависимость вязкости η от температуры различна (рис. 18.1). Очевидно, что стекло легче обрабатывать, если стекломасса длинная, когда высокая вязкость обеспечивается при сравнительно медленном охлаждении. Например, стекла щелочные не только легкоплавкие, но и длинные. Введение CaO , MgO , Al_2O_3 переводит щелочные стекла в более короткие. Готовые стеклянные изделия часто подвергают отжигу, т. е. нагреву до достаточно высокой температуры (температуры отжига) с последующим медленным охлаждением. Отжигом снимают внутренние температурные напряжения в отформованных изделиях, что предотвращает их трещинообразование. При необходи-

мости стекло можно снова нагреть и расплавить, при этом оно приобретает первоначальные свойства стекломассы, и переформовать в новые изделия.

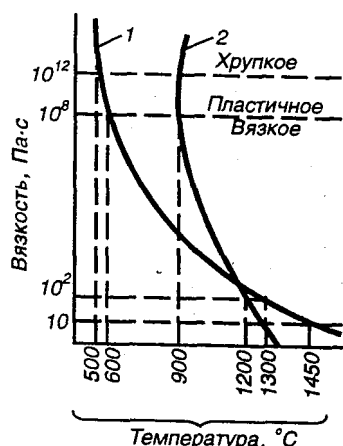


Рис. 18.1. Характер зависимости вязкости стекломассы от температуры:
1 — стекломасса длинная; 2 — стекломасса короткая

В процессе производства стекла и особенно на стадии его охлаждения возникает структура, которая может быть охарактеризована как промежуточная между полной беспорядочностью частиц жидкого расплава и полной упорядоченностью частиц вещества в кристаллическом состоянии. Неорганические стекла — это по существу субмикрогетерогенные системы, что позволяет по одной из гипотез рассматривать их структуру как скопление микрокристаллических, а точнее — кристаллитных образований размером от 10 до 300 \AA .

Согласно другой гипотезе в структуре стекла имеется непрерывная беспорядочная пространственная сетка (трехмерная). В ее узлах расположены ионы, атомы или группировки атомов. Например, в кварцевом стекле ионы Si расположены в центре тетраэдров, в углах которых размещены ионы O. При соединении тетраэдров SiO_4 между собой (через один ион кислорода) вершинами образуется непрерывная пространственная сетка, или каркас стекла (рис. 18.2). В промежутках между тетраэдрами могут располагаться ионы металлов (флюсов), например в силикатных стеклах. Тогда возникают не только ковалентные, как в кварцевых стеклах, но и ионные связи, которые частично разобщают тетраэдры, уменьшают количество и силу поперечных связей (рис. 18.3), за счет чего уменьшается стабильность, характерная для структуры стеклообразных чистых оксидов, легче предотвращается кристаллизация, понижается температура плавления. Всякое силикатное стекло можно рассматривать как совокупность различных по составу и строению кремнекислородных комплексов. Кристаллитная гипотеза Лебедева и гипотеза неупорядоченной сетки Захариасена рассматривают стекло как полимерное образование в виде непрерывной пространственной сетки с различной степенью упорядоченности в расположении атомов. Максимально упорядоченные области — кристаллиты, т. е. предельно маленькие кристаллы, состоящие из очень небольшого числа элементарных ячеек.

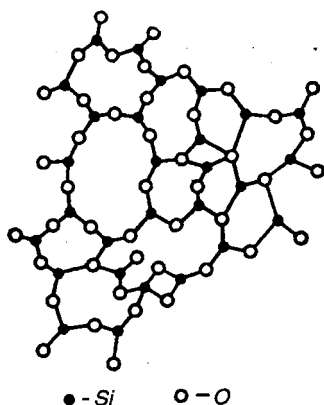


Рис. 18.2. Ионные связи в молекуле кварцевого стекла

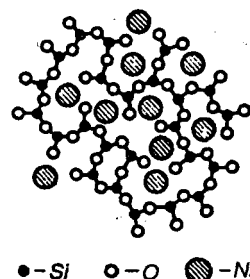


Рис. 18.3. Ионные связи в присутствии флюса (Na)

В настоящее время большинство ученых придерживается полимерного полиморфно-кристаллоидного строения стекла. Кристаллоид — частицы вещества, находящиеся в молекулярном раздроблении и способные к кристаллизации. Носители дальнего порядка (ДП) — кристаллиты — модифицируются в кристаллоиды, не имеющие дальнего порядка, а понятие полимеризации расширяется в понятие полиморфной полимеризации, в которой участвуют кристаллоиды. Природа стекла и его свойства определяются концентрационным соотношением кристаллоидов различных полиморфных модификаций (ПМ) и его изменением в зависимости от внешних воздействий (температура, давление и др.). При охлаждении стекломассы происходит: а) перемещение и объединение звеньев цепей, фрагментов двух- и трехмерных сеток, т. е. полимеризация и б) превращение кристаллоидов одних ПМ в кристаллоиды других ПМ, причем второе при стеклообразовании является определяющим. Таким образом, полимерно-кристаллитная концепция трансформируется в полимерно-кристаллоидную концепцию, а учитывая, что при стеклообразовании сополимеризуются кристаллоиды различных ПМ, — в концепцию полимерного полиморфно-кристаллоидного строения стекла, в котором порядок и некоторый беспорядок сосуществуют.

18.3. СВОЙСТВА СТЕКОЛ

Свойства стекол зависят не только от химического состава, технологических режимов варки, но и от термической обработки. Важным условием формирования свойств является характер технологии заделки при быстром охлаждении и отжига — при медленном охлаждении. В стеклообразном состоянии могут быть получены многие вещества. В строительстве в основном применяют силикатное стекло, основным стеклообразующим оксидом в котором служит SiO_2 . Химический состав силикатных стекол (% по массе): SiO_2 — 64—73,4; Na_2O — 10—15,5; K_2O — 0—5; CaO — 2,5—26,5; MgO — 0—45; Al_2O_3 — 0—7,2; Fe_2O_3 — 0—0,4; SO_3 — 0—0,5; B_2O_3 — 0—5. Средняя плотность стекол изменяется в пределах 2,2—6 г/см³. Самые тяжелые стекла содержат оксиды свинца, висмута, а самые легкие — оксиды лития, бериллия, бора. Модуль упругости стекол $4,5 \cdot 10^4$ — $9,8 \cdot 10^4$ МПа. Стекло в процессе эксплуатации в строительных конструкциях подвергается в основном изгибу, растяжению и удару. Расчетный теоретический предел прочности при растяжении стекла составляет 12000 МПа, практический R_p — 30—80 МПа, что объясняется наличием в стекле микронеоднородностей, микротрещин, внутренних напряжений, пороков стекла (свилей), инородных включений и др. Предел прочности стекла при сжатии $R_{сж}$ составляет 600—1000 МПа и более. Стекло плохо сопротивляется удару, т. е. оно относится к хрупким материалам. Прочность при ударном изгибе составляет $\approx 0,2$ МПа. Большое влияние на сопротивление удару оказывает состояние поверхности стекла и наличие в нем пороков. У закаленных стекол сопротивление удару в 5—6 раз больше, чем у отожженных.

Оптические свойства стекла характеризуются в основном свето-пропусканием (прозрачностью). Обычные силикатные стекла хорошо пропускают всю видимую часть спектра и практически не пропускают ультрафиолетовые и инфракрасные лучи. По оптическим свойствам различают прозрачное, окрашенное, бесцветное и рассеивающее стекло. Силикатное стекло обладает высокой стойкостью к большинству реагентов, за исключением плавиковой и фосфорной кислот. В настоящее время получено ячеистое стекло и электровакуумное стекло с повышенной химической стойкостью. Температурный коэффициент линейного расширения обычных строительных стекол изменяется от $9 \cdot 10^{-6}$ до $15 \cdot 10^{-6}$ 1/°C. От него зависит сопротивляемость стекла резким изменениям температуры (термическая стойкость). На термостойкость стекла влияют также состояние поверхности, форма, размеры изделий, их толщина. Наиболее низкий коэффициент температурного расширения у кварцевого стекла — $5,8 \cdot 10^{-7}$ 1/°C. Теплопроводность стекол 0,5—1 Вт/(м·К). Наибольшую теплопроводность имеет кварцевое стекло — 1,34 Вт/(м·К). Малой теплопроводностью обладают стекла с большим содержанием щелочных оксидов. Звукоизолирующая способность стекла относительно высока (при толщине стекла 1 см она соответствует кирпичной стене в полкирпича — 12 см).

18.4. ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛА

Производство строительного стекла состоит из подготовки сырьевых материалов (дробление, помол, сушка, просеивание и др.), приготовления шихты определенного химического состава, варки стекла, формования изделий и их отжига.

Варят стекло в стеклоплавильных печах непрерывного (ванновые печи) или периодического (горшковые печи) действия. Стекловарение завершается студкой стекломассы до температуры, при которой она приобретает вязкость, необходимую для формования изделий.

Формование изделий осуществляют различными способами: вытягиванием ленты стекла лодочным и безлодочным способами, прокатом, литьем, прессованием, выдуванием.

Вытягиванием изготавливают листовые стекла толщиной 2—6 мм, стеклянные трубы, стекловолокно. Сущность лодочного способа получения листового стекла заключается в следующем. В бассейн (он обычно имеет длину 5—6 м при глубине 1,2—1,5 м) с готовой стекломассой, охлаждаемой до температуры, соответствующей необходимой вязкости (не ниже 10^2 Па·с) погружается лодочка. Лодочка — это длинный прямоугольный шамотный брус со сквозным продольным вырезом, переходящим в верхней части в узкую щель. Под влиянием гидростатического напора стекломасса выдавливается через щель; растекания при этом не происходит (рис. 18.4). Если опустить на стекломассу, выдавливаемую из щели лодочки, горизонтально подвешенную стальную раму — «приманку», а затем оттягивать ее вверх с помощью валиков специальной машины ВВС (вертикального вытягивания стекла), то за приманкой потянется лента стекла. Отформованная лента стекла охлаждается и отжигается в шахте машины. После выхода из шахты от нее отрезают листы требуемых размеров.

При безлодочном способе (вертикальном и вертикально-горизонтальном) в стекломассу погружают огнеупорный поплавок со сквозной щелью или без нее. Поплавок способствует созданию направленного потока стекломассы, помогающего стабилизировать формирование ленты стекла. При этом способе лента стекла поднимается непосредственно со свободной поверхности стекломассы с помощью бортоформирующих роликов (рис. 18.5).

Методом проката, при котором стекломасса сливается на гладкую поверхность и прокатывается валками с гладкой или узорчатой поверхностью, изготавливают крупноразмерное листовое стекло (гладкое и узорчатое), коврово-мозаичные плитки, а также стекло, армированное металлической сеткой (рис. 18.6).

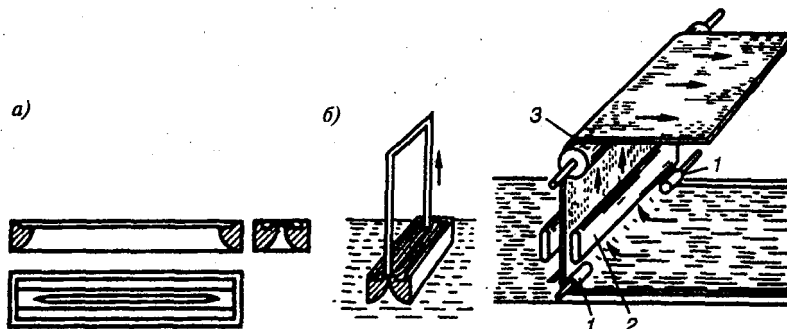


Рис. 18.4. Лодочный способ вытягивания стекла:
а — лодка; б — схема вытягивания ленты стекла

Рис. 18.5. Схема безлодочного вытягивания
стекла: 1 — растягивающие ролики; 2 —
холодильник; 3 — перегибной вал

Стекло с высоким качеством поверхности и утолщенное (8—30 мм) получают эффективным флоат-способом (рис. 18.7). При этом способе формование ленты стекла происходит на поверхности расплавленного олова в результате растекания стекломассы. Такое стекло не нуждается в последующей полировке, имеет ровные края.

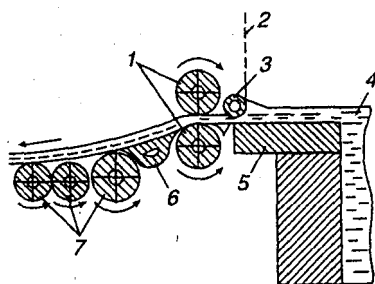


Рис. 18.6. Схема непрерывной прокатки листового стекла: 1 — прокатные валки; 2 — арматурная сетка; 3 — валик для арматурной сетки; 4 — выработочная часть стекловаренной печи; 5 — сливной порог; 6 — плита; 7 — транспортирующие валики

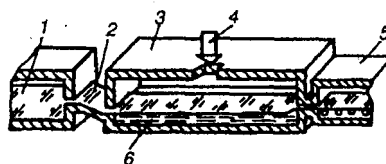


Рис. 18.7. Схема установки для производства стекла по способу флоат-процесса: 1 — стекловаренная печь; 2 — лоток для слива стекла; 3 — флоат-ванна; 4 — место подачи газов защитной атмосферы; 5 — печь отжига; 6 — расплав олова

Прокатывая стекло и загибая его края в форме швеллера или коробки, получают профильное стекло. При изготовлении труб используют способ вальцевания, при котором непрерывная струя стекломассы поступает на вращающийся вал, распределяется по его поверхности по спирали, затем развальцовывается и разглаживается с помощью роликов. Методом прессования в формах с помощью керн (пуансона), создающего давление на стекломассу, изготавливают изделия крупных размеров и большой толщины (стеклоблоки). Методом центробежного формования (частота вращения форм 800—1200 об/мин) изготавливают цилиндры, трубы, свето- и радиотехнические приборы.

Отформованные изделия обязательно отжигают для уменьшения внутренних напряжений в специальных печах или в шахтах машин ВВС.

Если стекло нагреть до пластичного состояния, а затем резко охладить его, то можно вызвать появление равномерно распределенных остаточных напряжений, которые придают стеклу повышенную механическую прочность при ударе и изгибе, повышенную термостойкость. Этот процесс называют закалкой; для закалки используют электрические печи или шахтные закалочные агрегаты.

Высокопрочные стекла получают путем химического и термохимического упрочнения его поверхности¹;

Некоторые стеклоизделия подвергают декоративной обработке, в частности напылению стеклопорошков плазменной горелкой на их подложки (листовое стекло, посуду). Листовое стекло шлифуют, полируют. Отходы шлифования можно использовать при производстве автоклавных силикатных материалов.

Разновидности ИСК, вязущая часть которых представлена затвердевшим неорганическим стеклорасплавом, называют стекло-конгломератами. Их изготавливают пока в небольшом объеме, например стеклокремнезит, стекломрамор, стеклошамотный огнеупор.

Общие закономерности формирования их структуры соответствуют общей теории ИСК. В качестве заполнителей могут использоваться отходы от ремонта различных печей (динасовые, шамотные, магнезитовые, шпинелевые и др.), а также горные породы: кварцевый песок, мраморная крошка и др. Стеклomасса при затвердевании вступает в физико-химическое взаимодействие с заполнителями, вследствие чего образуются пограничные контактные зоны. Изготовление стеклоконгломератов может производиться по двум принципиальным технологическим схемам: 1) расплав стекломассы в минимально необходимом количестве вводят в плотную смесь огнеупорных заполнителей, температура плавления которых выше

¹ Железцов В. А., Янбаева Г. У. и др. Способ упрочнения изделий из стекла. Авт. св. №793206. Б.И. 1981, 12, с.5

Железцов В. А., Янбаева Г. У. Зависимость ионного обменного упрочнения — 1 от его термической предыстории. — Физика и химия стекла, 1983, т. 9. № 4.

чем у стекломассы (не менее чем на 50°C); эта смесь перемешивается и формуется с уплотнением в изделие; 2) сырец изготавливают из тонкоизмельченного стекла, плавней, заполнителей, после чего образовавшуюся шихту нагревают до температуры плавления тонкоизмельченного стекла, что способствует цементации огнеупорного заполнителя и сырца в стеклоконгломерат. В качестве вяжущей части можно использовать бой стекла, эрклез и др. Для повышения де-формативности, снижения хрупкости применяют соответствующие добавки.

18.5. СТЕКЛЯННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Оконное стекло предназначено для остекления световых проемов жилых, промышленных и общественных зданий. Оно выпускается трех марок: полированное, неполированное, улучшенное, неполированное (толщиной 2; 2,5; 3; 4,5; 6 мм). В зависимости от толщины размеры листов от 400х500 мм до 1600х2500 мм. Стекло выпускают бесцветным, хотя возможен слабый зеленоватый или голубоватый оттенок, если при этом не снижается допустимая свето-пропускная способность стекла. Коэффициент светопрозрачности оконных стекол 0,84—0,87.

Витринное стекло имеет высокую прочность ($R_{сж}$ до 1200 МПа); выпускается двух марок: М-7 — полированное и М-8 — неполированное. Листы имеют стандартные размеры (до 3000х6000 мм) толщиной 6,5—12 мм. Это стекло применяют для остекления витрин, витражей и окон общественных зданий, а также для заполнения световых проемов ограждающих конструкций зданий и сооружений различного назначения. Коэффициент светопрозрачности 0,75—0,83.

Стекло листовое узорчатое имеет по всей поверхности на одной или обеих сторонах четкий рельефный узор; изготавливается способом проката (рис. 18.8). Узорчатое стекло может быть бесцветным и цветным, окрашенным в массу или посредством нанесения на его поверхность пленок оксидов различных металлов. Оно рассеивает падающий на него свет, поэтому его применяют в помещениях, где необходимо равномерное и мягкое освещение: для декоративного остекления оконных и дверных проемов, внутренних перегородок, крытых веранд, мебели и т. д. Толщина 3,5—7 мм, размеры в зависимости от толщины: 600х375 — 2500х1600 мм. Коэффициент общего светопропускания бесцветного стекла, имеющего узор на одной стороне листа, не менее 0,75; стекла, имеющего узор на обеих сторонах листа, — не менее 0,7.

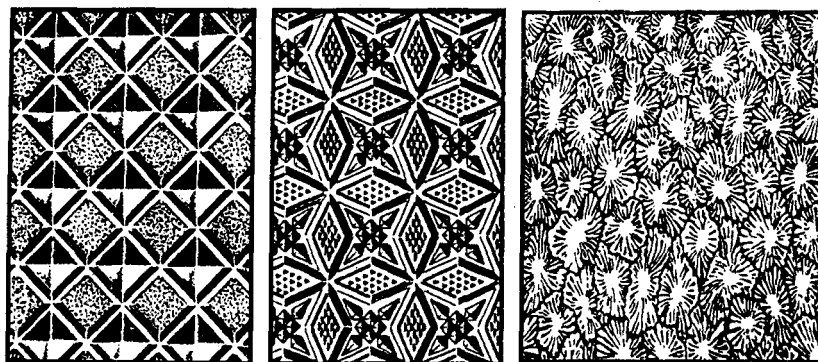


Рис. 18.8. Разновидности листового узорчатого стекла

Армированное листовое бесцветное и цветное стекло имеет внутри листа параллельно его поверхностям сварную или крученую сетку из стальной проволоки со светлой поверхностью или с защитным алюминиевым покрытием. Изготавливается оно способом проката. Применяется для остекления фонарей промышленных и общественных зданий, лестничных клеток, оконных и дверных проемов, устройства перегородок. Армирование увеличивает прочность стекла и не позволяет ему рассыпаться при ударах и пожаре. Армированное стекло может иметь одну или обе поверхности гладкими, рифлеными или узорчатыми. Цветное армированное стекло используют для ограждений балконов, лоджий, лифтовых шахт, устройства декоративных плафонов, перегородок в санаториях, пансионатах, на предприятиях общественного питания и торговли. Коэффициент светопропускания бесцветного армированного стекла 0,60—0,75. Размеры листов стекла: длина от 800 до 2000 мм, ширина от 400 до 1600 мм, толщина 5,5—6 мм.

Теплопоглощающее стекло применяют для остекления музеев, выставочных залов и транспорта с целью уменьшения солнечной и тепловой радиации. При его изготовлении в стекломассу вводят оксиды кобальта, железа или селена. Стекло выпускают обычно голубого, серого и бронзового оттенков. При остеклении необходимо предусматривать определенный зазор между рамой и стеклом, так как при изменениях температур в стекле возникают большие температурные деформации.

Теплоотражающее стекло изготавливают нанесением на поверхность тонких (0,3—1 мкм) пленок металлов или их оксидов, за счет чего отражается большая часть инфракрасных лучей и само стекло нагревается незначительно. Такие стекла пропускают 40—60% теплоты и повышают теплозащиту в холодную погоду. Стекла имеют голубой, золотистый, оранжевый и другой цвет, а их светопропускание составляет 30—70%.

Увioletовое стекло изготавливают из стекольной шихты с минимальным содержанием оксидов железа, титана и хрома. Оно пропускает 25—75% ультрафиолетовых лучей и используется для остекления в лечебных, детских учреждениях, оранжереях и т. п.

Закаленное стекло выпускают в виде стандартных листов. Оно применяется для устройства дверей, перегородок, потолков. При разрушении такое стекло распадается на мелкие осколки с тупыми нережущими краями.

Многослойное стекло (армированное или неармированное) состоит из нескольких листов стекла, прочно склеенных между собой прозрачной эластичной прокладкой. Наибольшее распространение получило стекло плоское безопасное трехслойное на поливинилбутиральной пленке (триплекс), получаемое склеиванием двух листов стекла с поливинилбутиральной пленкой между ними. При разрушении оно не дает осколков; предназначается для остекления транспорта, тракторов и других сельскохозяйственных машин.

Электропроводящее стекло используется в строительстве для изготовления стеклопакетов в качестве источников теплоты. Их изготавливают напылением на поверхность стекла тонкой (0,5 мкм) пленки солей металлического серебра, которые образуют электропроводящие прозрачные покрытия с целью обогрева стекла и предотвращения запотевания.

Стекло устойчивое к радиоактивным излучениям выпускают с высоким содержанием свинца и бора. Например, тяжелое свинцовое стекло, содержащее 80% оксида свинца, эквивалентно стали по защитной способности от радиоактивных излучений.

Блоки стеклянные пустотелые представляют собой закрытые полые стеклянные коробки с гладкими наружными и ребристыми внутренними поверхностями. Ребра или призмы на внутренней поверхности препятствуют прямой видимости через блок. Их применяют для устройства наружных и внутренних светопрозрачных ограждений в зданиях и сооружениях, где требуется большая освещенность и ограниченная видимость (лестничные шахты, санузлы). Ограждения из стеклоблоков обладают высокой огнестойкостью, тепло- и звукоизоляционной способностью, гигиеничны. Они имеют квадратную или прямоугольную форму, бывают неокрашенные и цветные. Коэффициент светопропускания 0,33—0,55, термостойкость (перепад температур) $\geq 30^{\circ}\text{C}$, $R_{\text{сж}} > 1,5$ МПа, сопротивление удару $\geq 6,8$ Дж. Длина блоков 194—244 мм, ширина 194—244 мм, толщина 75—98 мм, масса 2,8—4,3 кг.

Профильное стекло представляет собой длинномерные элементы, имеющие в сечении разнообразный профиль. Наибольшее применение имеет стеклопрофилит швеллерного и коробчатого сечения (всего 9 марок). При использовании профильного стекла в качестве стенового материала создается декоративный эффект, сокращаются стоимость строительства и расходы по текущему ремонту и уходу. Его применяют также при устройстве перегородок и прозрачных плоских кровель. Профильное стекло выпускается неармированным и армированным, бесцветным и цветным, с аэрозольным оксидно-металлическим покрытием. Коэффициент светопропускания профильного стекла $\geq 0,5$ —

0,65, теплопроводность $\leq 0,76$ Вт/(м·К), $R_{сж} \geq 1—7$ кПа в зависимости от марки, термостойкость $\geq 40^\circ\text{C}$.

Стена из коробчатых (в один ряд) или швеллерных (в два ряда) стек-лодеталей по акустическим свойствам не уступает межкомнатным оштукатуренным перегородкам из кирпича.

Стеклопакеты клееные представляют собой два (или более) плоских стекла (оконного, витринного, армированного, узорчатого и др.), соединенных между собой по периметру так, что между ними образуется замкнутая прослойка, заполненная сухим воздухом или другим газом. Стеклопакеты применяют для остекления окон и дверей, они предотвращают промерзание и запотевание окон, обладают достаточной тепло- и звукоизолирующей способностью. По назначению они подразделяются на обычные, светорассеивающие, упрочненные, безосколочные, солнцезащитные, звукоизоляционные и электрообогреваемые. Стеклопакеты в зависимости от конструкции выпускают следующих типов: СПО — однокамерные без обрамляющей рамки; СПОР — однокамерные с обрамляющей рамкой; СПД — двухкамерные без обрамляющей рамки. Толщина стеклопакетов 12—42 мм, ширина и длина (максимальные) от 1000x1400 мм до 2950x2950 мм (в зависимости от типа). Стеклопакеты должны быть герметичными. Точка росы внутри стеклопакетов должна быть не выше -40°C , для высшего сорта — не выше -50°C . Для заполнения внутренней полости распорной рамки стеклопакета в качестве влагопоглотителей применяют технический силикагель или синтетический, гранулированный цеолит.

Стекложелезобетонные конструкции в зависимости от несущей способности, свето- и звукоизоляции и других свойств подразделяют на стеновые, конструкции покрытий, сводов и куполов. В этих конструкциях несущей частью является железобетонный каркас, а стеклянные детали составляют световое пространство каркаса. Для получения равномерного освещения естественным верхним светом помещений с большой площадью (перроны, выставочные павильоны, крытые бассейны) изготавливают стекложелезобетонные конструкции с применением стеклоблоков, линз и призм, уложенных на растворе.

Трубы стеклянные и фасонные части к ним предназначаются для сооружения напорных, безнапорных и вакуумных трубопроводов, используемых для транспортирования агрессивных жидкостей и газов (за исключением плавиковой кислоты), пищевых продуктов, воды и других материалов при температуре от -50 до $+120^\circ\text{C}$. Стеклянные трубы выпускают диаметром условного прохода от 40 до 200 мм и длиной 1500—3000 мм. Эти трубы хорошо сопротивляются коррозии, значительно дешевле металлических, прозрачны, гигиеничны. При монтаже трубопроводов стеклянные трубы соединяют с помощью специальных резиновых, пластмассовых или металлических муфт или склеивают специальными клеями. Их недостатки: хрупкость и невысокая термостойкость (около 40°C).

Стеклянную черепицу применяют для устройства свегопрозрачных фонарей в кровлях из керамической или бетонной черепицы. В России стеклянная черепица не получила распространения.

Облицовочные материалы и изделия из стекла по структуре подразделяются на три группы: аморфные (цветное листовое стекло, стемалит, марблит, стеклянные плитки, смальта и др.), гетерогенные аморфные на основе стекла и газовоздушной смеси (пенодекор, по-рокремнезит, коврово-мозаичная плитка и др.), гетерогенные стеклокристаллические материалы (стеклокристаллит, стеклокерамит, стеклокремнезит и др.).

Цветное листовое стекло изготавливают путем окраски электрохимическим способом поверхности обычного или термоупрочненного стекла. В основном выпускают листы бронзового цвета, коэффициент светопропускания которых 0,15—0,2. Их применяют для декоративного остекления окон, дверей, перегородок, мебели, для изготовления витражей.

Декоративный триплекс представляет собой листы стекла с запрессованной между ними цветной пленкой или тканью. Его применяют для декоративной внутренней облицовки и устройства перегородок.

Марблит — плоское цветное глушеное стекло толщиной 5—25 мм в виде листов с полированной лицевой поверхностью и рифленой с тыльной стороны. Его применяют для облицовки наружных и внутренних стен лечебных помещений, магазинов, общественных зданий, мемориальных комплексов, витражей, вместо природных каменных материалов (гранита черного цвета, габбро и др.).

Стемалит — листовое плоское стекло, покрытое с одной стороны керамической эмалевой краской. Для закрепления краски и упрочнения стекла его подвергают термообработке. Покрытие может быть защищено тонким слоем алюминия. Стемалит применяют для наружной и внутренней отделки стен и перегородок, он имеет высокую термостойкость, устойчивость против атмосферных воздействий, сохраняет цвет (желтый, синий, красный, серый, черный и др.). Стемалитом облицованы в Москве гостиницы Аэрофлота и «Националь». Он выпускается 27 цветов толщиной 5—7,5 мм. Размеры стемалита от 400х900 до 1500х1100 мм.

Стекломрамор — разновидность марблита разных цветов, имитирующая мрамор. Его применяют для декоративной облицовки стен, полов, оформления интерьеров, футеровки резервуаров.

Облицовочная плитка из неокрашенного или цветного глушеного стекла имеет размеры от 50х50 до 150х150 мм. Их толщина 4—9 мм. Лицевая поверхность плиток гладкая или рельефная, тыльная сторона должна быть рифленой или шероховатой. Термостойкость 40—45°C.

Плитки стеклянные облицовочные коврово-мозаичные и ковры из них применяют для наружной и внутренней облицовки зданий, изготовления декоративно-художественных панно. Размеры плиток 21х21х5 и 46х46х5 мм. Они выпускаются непрозрачными, разных цветов с матовой или блестящей поверхностью, которая может быть гладкой или рифленой. Коврово-мозаичные плитки выпускают в виде ковров из одного (простой набор) или более цветов (сложный набор). Плитки долговечны, гигиеничны и получили широкое применение.

Эмалированную плитку изготавливают из цветного оконного или узорчатого стекла путем его резки, окрашивания с лицевой стороны непрозрачной эмалью и ее сплавления. Эти плитки применяют для внутренней облицовки. Их размеры от 100х100 до 200х200 мм, толщина 4—6 мм.

Смальта — мелкие кусочки цветного стекла (от 1 до 2 см²), применяемые для создания различных мозаичных картин или панно. Смальту изготавливают литьем из стекломассы или прессованием из стеклянного порошка. Смальты выпускают 200 цветов и оттенков. Мозаичные картины из смальты украшают станции Московского метро и другие здания.

Пенодекор выпускают в виде плит размером 450х450 мм, толщиной до 40 мм; лицевая сторона плит покрыта сплошной стекловидной пленкой разнообразных цветов.

Ситаллы — стеклокристаллические материалы. Степень кристаллизации стекла составляет до 90—95%, размер кристаллических зерен ситаллов обычно менее 1 мкм. Именно тонкозернистость закристаллизованного стекла придает ему повышенные механические свойства, хотя она зависит и от фазового состава кристаллов и стеклофазы. Ситаллы можно получать как по керамической технологии (по порошковому методу), так и по технологии стекла, дополненной кристаллизационными устройствами для дополнительной термообработки, чтобы получить мелкие, равномерно выделяющиеся по всему объему стекломассы кристаллы. В процессе кристаллизации создают условия для распределения в массе стекла множества микроскопических зародышей кристаллизации, которыми служат добавки-катализаторы благородных металлов: Ag, Pt, Au, Pd и др.; оксиды: TiO₂, ZnO₂, ZrO₂ и др.; летучие катализаторы: хлор, фтор, сульфидная сера и др. или мельчайшие капельки других расплавов, не смешивающихся с основным стеклом.

Средняя плотность ситаллов $2,5\text{—}2,6\text{ г/см}^3$, $R_{сж}$ — до 600 МПа, $R_{и}$ — до 250 МПа, температура размягчения $1000\text{—}1350^\circ\text{C}$, их твердость больше, чем у стекла, и приближается к твердости закаленной стали. Ситаллы обладают высокой стойкостью к кислотам (кроме плавиковой) и щелочам. Цвет ситаллов: серый, коричневый, кремовый, белый (глухой и прозрачный) и др. Их применяют в электронике, машиностроении, строительстве, быту, ракетостроении, астро-зеркалах и др. В строительстве из ситалловых плит устраивают полы промышленных цехов, где имеются агрессивные среды, возможен разлив расплава металлов, большие нагрузки от движущегося тяжелого оборудования, а также для футеровки мельниц, лотков сыпучих материалов, в теплообменниках, для изготовления химической аппаратуры.

Ситаллопласты изготавливают на основе фторопластов и ситаллов. Они имеют высокую химическую стойкость и износостойкость по сравнению с ситаллами и фторопластами.

Стеклокристаллит — плиты размером 300×300 и 300×150 мм, применяемые для облицовки стен и устройства полов. Их изготавливают сплавлением гранул из бесцветного или окрашенного стекла.

Стеклокремнезит выпускается в виде облицовочных плит. Его изготавливают спеканием массы из стеклянных гранул с наполнителем (песком, шамотом и др.).

Стекловолоконное получают из стекломассы разными способами: фильерным, дутьевым, центробежным, штабиковым. Сущность фильерного способа состоит в том, что из расплава стекла через отверстия (фильеры) в платиновой пластине вытягивают тонкие прочные нити, которые, охлаждаясь, затвердевают и наматываются на вращающийся барабан. При этом способе получают длинные нити, которые применяют для выработки стеклотканей, стеклопластиков и гидроизоляционных изделий.

При дутьевом и центробежном способах получают стекловолокно диаметром $5\text{—}15\text{ мкм}$ небольшой длины ($5\text{—}50\text{ см}$). Такое стекловолокно называют стекловатой. Оно отличается от минеральной большей химической стойкостью; коэффициент теплопроводности у них примерно одинаков. Средняя плотность стекловаты в рыхлом состоянии 130 кг/м^3 . Температуростойкость зависит от химического состава стекла. Из стекловаты изготавливают теплоизоляционные изделия: маты, полосы, плиты, скорлупы.

Пеностекло выпускают в виде блоков и гранул. Сырьем служит размолотое стекло, смешанное с газообразователем (известняком, древесным углем и другими материалами, выделяющими газ при размягчении стекла). При нагревании этой смеси происходит вспучивание размягченного стекла выделяющимися газами. Пеностекло хорошо подвергается механической обработке — пилится, гвоздится и склеивается. Коэффициент теплопроводности $0,04\text{—}0,15\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $R_{сж}$ — $0,1\text{—}0,15\text{ МПа}$, средняя плотность — $100\text{—}700\text{ кг/м}^3$. Применяют его для тепло- и звукоизоляции в строительных конструкциях, холодильниках, промышленном оборудовании.

Гранулированное пеностекло используют в качестве легкого заполнителя для легких бетонов. Его изготавливают вспениванием во вращающихся печах сырьевых гранул из стеклянного порошка с пенообразователем.

18.6. МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ ШЛАКОВЫХ РАСПЛАВОВ

ИСК на основе «высокотемпературного цемента» — шлакового расплава представляет собой строительный материал, в котором заполнители из полизернистого шлака или других огнеупорных материалов сцементированы затвердевшим шлаковым расплавом. Заполнители должны иметь повышенную огнеупорность по сравнению с вяжущей частью. Разность между температурами плавления заполнителей и вяжущей частью должна быть не менее 70—90°C.

Шлаковый расплав (горячая технология) или шлаковое тесто в виде высокодисперсного шлакового порошка с водой (холодная технология) смешивают в расчетных количествах с заполнителем (термозит, керамзит и др.) для образования конгломерата. Формирование структуры ИСК при горячей технологии происходит в процессе остывания. При холодной технологии отформованное изделие обжигают до температуры спекания, при которой наиболее легкоплавкие компоненты шлаковой связки переходят в жидкое состояние, а затем изделия охлаждают. В обоих случаях образуются контактные зоны между шлаковым сплавом и зёрнами заполнителя, а связующее приобретает стеклокристаллическую микроструктуру.

В настоящее время шлаки металлургической промышленности в огненно-жидком состоянии используют как готовый расплав для получения шлаковых блоков, камней, плиток, ячеистых заполнителей для бетонов, шлаковой ваты, шлакоситаллов, литого щебня. Режим охлаждения и состав расплава влияют на степень кристаллизации шлака; с ускорением охлаждения количество стекловатой фазы увеличивается. Стеклообразующим компонентом служат SiO_2 и Al_2O_3 . При медленном охлаждении (особенно кислых шлаков) в них выпадают в кристаллическом виде сравнительно тугоплавкие компоненты (50—95%), так что к моменту полного затвердевания шлак представляет собой микроконгломерат кристаллов отдельных фаз, сцементированный наиболее легкоплавким стеклом. Изменяя фазовый состав, можно получить ИСК на основе шлаковых расплавов с наилучшими заданными свойствами (согласно закону створа).

В гранулированных доменных шлаках, получаемых при быстром охлаждении расплавленных шлаков, стеклофазы содержится обычно 50% и более. Прочность медленно охлажденных шлаков значительно выше за счет большего содержания кристаллической фазы, но меньше деформативность, чем у быстроохлажденных шлаков с повышенным содержанием стекловидной фазы.

Для повышения плотности микроконгломерата в шлаковый расплав вводят специальные добавки, способствующие его дегазации (глина и др.), что приводит к повышению прочности, химической стойкости, износостойкости. Плотные камни, плиты, трубы и другие изделия получают путем разлива металлургических шлаков, доставляемых непосредственно из доменных или мартеновских печей. Получаемые высокопрочные плиты и камни применяют при устройстве дорог и полов промышленных зданий, они имеют длительный срок службы. Специальные плитки с успехом эксплуатируют в качестве антикоррозионных покрытий.

Шлакоситаллы получают путем каталитической кристаллизации стекла на основе шлаков. Они являются типичными микрошла-коконгломератами и состоят из 60—70% кристаллической фазы и 30—40% стекловидной. Степень кристаллизации регулируют введением катализаторов кристаллизации: TiO_2 , CaF_2 , P_2O_5 и режимом термообработки. Размер кристаллов $\leq 0,5$ —1 мкм. Стекловидная фаза заполняет пространство между кристаллами и цементирует их между собой.

Производство шлакоситаллов состоит из трех этапов: 1) варка стекла из шихт, содержащих катализаторы кристаллизации; 2) формование изделий; 3) термическая обработка отформованных изделий в печах-кристаллизаторах для получения мелкокристаллической структуры. Шлакоситаллы имеют высокую механическую прочность ($R_{сж}$ до 650 МПа), высокую плотность (ρ_m — до 2700 кг/м³), термическую стойкость — до 750°C,

химически стойки и износостойки. Шлакоситаллы применяют в качестве конструкционного материала для защиты оборудования от агрессивных и абразивных воздействий, для устройства полов, фасонных изделий (лотки, карнизы, подоконники, плинтусы и др.), труб, кухонных раковин, облицовки стен в гражданском и промышленном строительстве. Все более широкое развитие получает производство пеношлако-ситаллов со средней плотностью 300—600 кг/м³ и $R_{сж}$ до 14 МПа, теплопроводностью 0,08—0,16 Вт/(м·К) и рабочей температурой до 750°С.

Перспективным является совместное использование плотного листового шлакоситалла с пеношлакоситаллом в стеновых и других конструкциях зданий.

18.7. КАМЕННОЕ ЛИТЬЕ И МАТЕРИАЛЫ НА ЕГО ОСНОВЕ

Камнелитные изделия (брусчатка для дорог, плиты, трубы, желоба и др.) получают путем расплавления предварительно подготовленной шихты из горных пород и соответствующих добавок к ним, отливки расплава в формы, кристаллизации изделий, их отжига и охлаждения. Сырьем для производства темноокрашенных изделий служат диабазы и базальты, а для светлоокрашенных изделий — доломит, мел, известняк, мрамор, кварцевый песок. Целесообразно применять отходы при разработке горных пород. Для понижения температуры плавления в шихту вводят флюсы (плавиковый шпат — 3%); для ускорения процессов кристаллизации при охлаждении расплава — тугоплавкие материалы (магнезит, хромит и хромитовую руду), действующие как центры кристаллизации; для отбеливания расплава — оксид цинка в количестве 0,8%. Перед загрузкой в печь сырьевые материалы измельчают, просеивают и дозируют в необходимом соотношении.

Для получения темноокрашенных изделий шихту плавят в ваннных печах или вагранках, светлоокрашенных изделий — в электропечах. При непрерывной отливке изделий расплавленный материал поступает в копильники, где создается запас однородной массы с температурой 1180—1250°C. Охлаждение расплава перед разливкой в формы необходимо для уменьшения усадочных дефектов (трещин, раковин). Далее расплав выливают в земляные, металлические или силикатные формы, подогретые до температуры 600—700°C, где он постепенно охлаждается. Затем изделия подвергают отжигу в туннельных или камерных печах при температуре 600—900°C или в специальных печах. Отжиг способствует снижению температурных напряжений, связанных с охлаждением и кристаллизацией, увеличению сопротивляемости ударным нагрузкам.

Введением добавок и регулированием температуры в процессе изготовления камнелитных изделий можно управлять степенью их кристаллизации. Основные минералы, входящие в состав камнелитных изделий: пироксены, плагиоклазы, оливин, магнетит и др. Их плотность 2900—3000 кг/м³, $R_{сж}$ — 200—240 МПа, R_p — 20—30 МПа, они имеют высокую морозостойкость и химическую стойкость и эксплуатируются в особо тяжелых условиях, например плитки для полов используют в цехах с агрессивными средами, в дорожном строительстве, изделия из каменного литья применяют для футеровки бункеров, течек, корпусов флотационных машин, травильных ванн, отстойников и т. п.

Из расплава горных пород получают также волокнистый материал (горную вату) с длиной волокон 2—60 мм. Ее изготавливают по той же технологии, что и стекловату. Марки изделий из горной ваты по средней плотности от 50 до 250, коэффициент теплопроводности их 0,077—0,064 Вт/(м·К).

Производство ИСК на основе каменного литья возможно по схеме, когда огнеупорный наполнитель объединяют с расплавом, после чего изделие формуют, а при необходимости и прессуют с последующим охлаждением до обычных температур. По другой схеме наполнитель объединяют с холодным высокодисперсным сырьем (в присутствии какой-либо жидкой среды), после чего отформованные изделия подвергают определенной термической обработке. Во время этой обработки сырьевая прослойка в отформованном изделии частично расплавляется и при охлаждении переходит в стекло-кристаллическое состояние с цементирующими свойствами, фиксируя микро- и макроструктуру конгломерата на основе каменного литья. Полученный по обеим технологиям конгломерат характеризуется микроструктурой вяжущей части и контактного слоя между вяжущим веществом и наполнителем, существенно влияя на макроструктуру ИСК и его свойства. При оптимизации составов и технологических переделов можно получать эти ИСК с комплексом требуемых технических свойств.

19.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Металлами называют простые вещества, которые при обычных условиях твердые (только ртуть находится в жидком состоянии) и отличаются характерным металлическим блеском и непрозрачностью, ковкостью и свариваемостью, тягучестью, электропроводностью и теплопроводностью, высокой истинной плотностью, как правило, большей единицы. Металлы с плотностью меньше 5 г/см^3 условно называют легкими. Большинство же металлов имеют истинную плотность больше 5 и их именуют тяжелыми. Весьма легким является калий с плотностью 0,86, самым тяжелым — осмий с плотностью 22,5: Для всех металлов (а их 76 из 106 химических элементов системы Д.И. Менделеева) характерна способность их атомов сравнительно легко отщеплять внешние (валентные) электроны и переходить в положительно заряженные ионы (катионы). Это своеобразие металлов проявляется в их физических и химических свойствах. Оторвавшиеся от атомов свободные электроны непрерывно перемещаются между положительно заряженными ионами под влиянием самой небольшой разности потенциалов, вследствие чего и проявляются высокая тепло- и электропроводность. Оставаясь общими (свободными), они образуют электронный газ. Последний, подобно подвижному «клею», распространяется по всему металлу, скрепляя положительно заряженные ионы. Электронный клей универсален для всех атомов, почти не зависит от химической валентности.

Из физических свойств металлов особо выделяется ковкость, т. е. их способность сплющиваться, прокатываться, например из железного бруска толщиной 80—100 мм получают прокатыванием проволоку толщиной 4 мм и тоньше. Медь можно вытягивать в проволоку толщиной в сотые доли миллиметров, вольфрам — 0,015 мм, а для позолоты изготавливают из золота листочки толщиной 0,003 мм. Из толстых кусков металла (болванок) получают балки, рельсы и другие изделия большой протяженности. Такая способность металлов увеличивается с повышением температуры и поэтому обработка выполняется в нагретом состоянии.

Среди металлов редкие отличаются хрупкостью. Но они не имеют распространения при изготовлении строительных изделий, например сурьма, висмут, марганец и некоторые другие. Для металлов, как отмечено выше, характерен «металлический» блеск, однако по окраске они разнообразны. В производстве их делят на черные — железо и его сплавы, а все остальные относят к цветным. Кроме чистых (простых) металлов в технике чаще применяют металлические сплавы с металлами и металлоидами (углеродом, кремнием и др.). Металлы отличаются друг от друга температурой плавления (ртуть — при температуре -39°C , самый тугоплавкий вольфрам — при температуре 3370°C) и твердостью (от мягкого свинца — царапается ногтем до самого твердого хрома — царапается алмазом).

От химической активности, легкости отрыва валентных электронов от атомов зависит способность металла соединяться с кислородом при непосредственном с ним взаимодействии. В частности, в химических реакциях металлы чаще всего являются восстановителями, вытесняя обычно водород и менее химически активные металлы¹.

В строительстве используются не чистые металлы, а их сплавы. Они отличаются от металлов температурой плавления, теплопроводностью, электропроводностью, твердостью и другими свойствами, что связано с затруднениями в перемещении свободных электронов в сплавах вследствие присутствия в их среде примесей. Так, например, если твердость железа в условных единицах равна 50—80, то при введении в

¹ Ряд металлов по химической активности был установлен акад. Н.Н. Бекетовым в 60-х годах XIX в.

железо углерода с получением железуглеродистого сплава, именуемого чугуном, твердость повышается до 210—410, при сплаве железа с углеродом и хромом в виде инструментальной стали твердость составляет 450—700. В сплавах могут улучшаться и другие ценные для практики свойства, поэтому в строительстве в основном используют черные сплавы — стали и чугуны, из цветных — алюминий и сплавы на его основе.

19.2. ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЧУГУНА И СТАЛИ

Все металлы получают из руд, залегающих в земной коре. В чистом (самородном) виде добывают только платину и золото. Вначале требуется из руды удалить пустую породу, т. е. примеси различных минералов. Процесс обогащения руды возможен с помощью воды, так как руда тяжелее пустой породы и при измельчении в потоке воды легкая порода выносится, а руда остается. Применяют и другие способы обогащения руды: механические, электромагнитные, физико-химические. Для выделения металла из обогащенной руды используют технологические приемы, основанные на восстановлении металла. Хорошим восстановителем служит уголь, так как атомы углерода относительно легко отдают свои электроны.

19.2.1. ПОЛУЧЕНИЕ ЧУГУНА

Для выплавки железа из руды разработан доменный процесс с получением в нем чугуна, поступающего затем на выработку стали. Домна — высокая шахтная печь высотой до 30 м, шириной более 6 м. Стенки доменной печи выложены из огнеупорного кирпича, а снаружи кладка заключена в стальной кожух толщиной 20—40 мм. Загрузка рудой, коксом, флюсом послойная, причем обычно железорудный материал переводится в сыпучий агломерат. Схема работы доменной печи (рис. 19.1): в нижней части домны сгорает кокс: $C + O_2 = CO_2$. Углекислый газ, поднимаясь, соприкасается с раскаленным коксом и переходит в оксид углерода: $CO_2 + C = 2CO$. Еще выше в шахте оксид углерода взаимодействует с раскаленной рудой: $CO + Fe_2O_3 = 2FeO + CO_2$ и далее: $FeO + CO = Fe + CO_2$. Чугун стекает в нижнюю часть домны. Из домны чугун выпускают через специальное отверстие — летку. Первые капли чугуна образуются при температуре 1250°C и стекают между кусками кокса в горне. Температура чугуна в домне равна 1480—1520°C. Содержание углерода в чугуне составляет 4—4,5%.

Флюсы играют роль плавня, способствуя переводу пустой породы в шлак. Доменный шлак с содержанием в нем Ca_3O_3 легче чугуна и собирается выше его с последующим выпуском наружу из другого отверстия домны. Он служит ценным сырьем для производства различных строительных материалов.

Выделяющиеся из домны газы, именуемые колошниковыми, содержат оксид углерода CO, поэтому как сгорающее топливо направляются для обогрева каналов кауперов домны и воздуха в них, который затем поступает в доменную печь и поддерживает в ней горение кокса. Каупер сложен из огнеупорного кирпича и заключен в железный кожух. Имеет нагреваемую насадку.

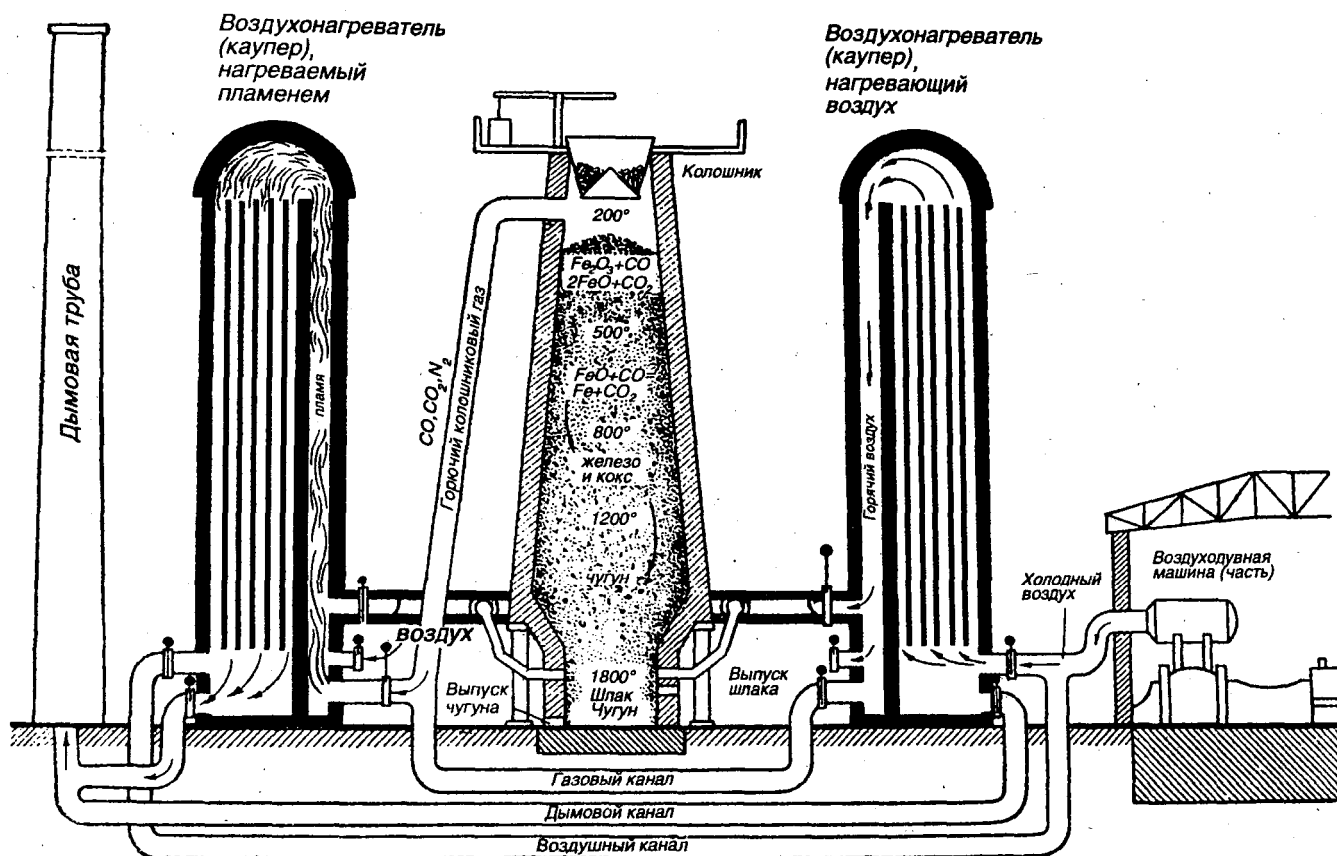


Рис. 19.1. Схема работы доменной печи

Запущенная в действие доменная печь функционирует непрерывно в течение нескольких лет. Руду, кокс и флюсы периодически добавляют через верхнее отверстие (колошник) печи. Также периодически производится выпуск из нее чугуна и шлака — через каждые 4—6 ч. При этом 99—99,8% железа переходит в чугун и только 0,2—1,0% — в шлак. Кроме углерода в составе чугуна присутствуют элементы кремния, марганца, серы, фосфора и пр. По назначению доменные чугуны разделяют на литейный и передельный. Литейный чугун переплавляют, и из него отливают чугунные изделия. Из передельного чугуна получают сталь. Он составляет около 90% всей выплавки чугуна. В нем содержится повышенное количество углерода, 0,3—1,2% Si, 0,2—1,0% Mn, 0,2—1,0% P, 0,02—0,07% S.

Современная доменная печь может выплавлять 12000 т чугуна и выдает около 4000 т шлака, а также до 27000 т колошникового газа в сутки. Кроме процесса, осуществляемого в домне, существует вне-домненное производство железа, что относится к более прогрессивному способу. Он заключается в непосредственном получении железа из руды, минуя доменную печь. На производстве получают очень чистое металлическое железо без применения кокса. С этой целью при глубоком обогащении железных руд изготавливают концентраты с высоким содержанием железа (70—71,8%), почти полностью освобожденные от серы и фосфора. Затем действуют твердым или газообразным восстановителем, получая металлизированные окатыши. Если используют твердый восстановитель — углерод (в виде каменного угля), тогда — с обжигом в шахтной печи, трубчатой печи, реторте. Если используют газообразный восстановитель — природный газ, тогда — с конвертированием газа в невысоких шахтных печах или ретортах. Способы металлизации могут быть и иными — в кипящем слое на решетке. Вследствие относительно низкой температуры бездомненного процесса получаемое железо, обычно спеченное в куски, содержит меньше примесей. Чугуны обладают высокими литейными свойствами, малой пластичностью. Они разделяются на белый и серый.

Белый чугун (передельный) содержит весь углерод в химически связанном состоянии в виде карбида железа, именуемого цементитом Fe_3C . При нормальной температуре его структура складывается из двух фаз: феррита и цементита. Белым этот чугун называется потому, что в изломе он имеет матово-белый цвет. Белый чугун имеет высокую твердость и большую хрупкость, вследствие чего его невозможно обрабатывать режущим инструментом. Его применяют, главным образом, для выплавки стали, а также для получения ковкого чугуна.

Серые чугуны содержат углерод в свободном состоянии в виде графита (100% C); они называются серыми потому, что вследствие наличия в них графита имеют в изломе серый цвет. Содержание C — до 3,8%.

По форме графитовых включений серые чугуны разделяют на обычный серый с пластинчатым графитом, вермикулярный серый, высокопрочный и ковкий. По структуре металлической основы их разделяют на ферритный, ферритно-перлитный и перлитный.

Обычный серый чугун получают медленным охлаждением жидкого расплава или аустенита высокоуглеродистых сплавов. В нем частицы графита имеют пластинчатую форму. В зависимости от механических свойств и назначения серый чугун с пластинчатым графитом разделяют на марки: СЧ-25, СЧ-30, СЧ-35, СЧ-40, СЧ-45 (цифры показывают минимальный предел прочности при растяжении, кгс/мм^2).

Вермикулярный серый чугун получают путем специальной плавки или обработки с изменением формы графита на волокнистую, червеобразную (вермикулярную), вследствие чего этот чугун обладает лучшими свойствами по сравнению с обычным серым чугуном. Высокопрочный чугун содержит шаровидный графит (рис. 19.2, а), получаемый при выплавке с присадкой небольшого количества магния или церия. Благодаря шаровидной форме графита прочность при растяжении и изгибе высокопрочного чугуна значительно выше, чем обычного серого чугуна с пластинчатым графитом.

Высокопрочный чугун разделяют на марки: ВЧ38-17, ВЧ42-12, ВЧ45-5, ВЧ50-2, ВЧ50-7, ВЧ70-2, ВЧ80-2, ВЧ100-2, ВЧ120-2. Буквы ВЧ означают высокопрочный чугун, первые числа за ними — минимальный предел прочности при растяжении (в кгс/мм^2), а последующие числа — минимальное относительное удлинение (в %).

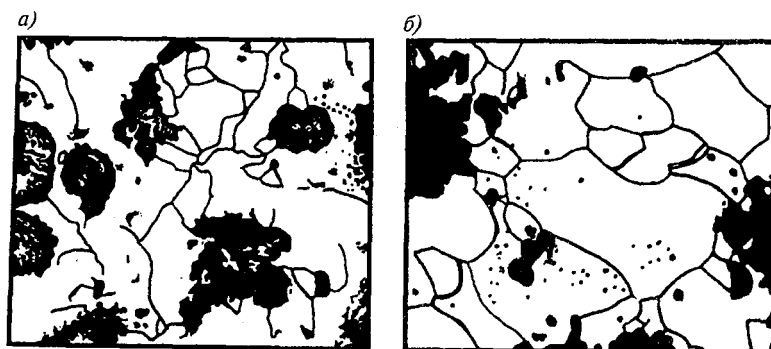


Рис. 19.2. Микроструктура высокопрочного ферритного чугуна с шаровидным графитом (а) ($\times 250$) и ковкого ферритного чугуна с хлопьевидным графитом (б) ($\times 500$)

Ковкий чугун содержит хлопьевидный графит (рис. 19.2, б). Его получают из белого чугуна путем графитизирующего отжига (томления), при котором происходит распад цементита. Хлопьевидный графит имеет почти равноосную компактную форму. Этот чугун разделяют на марки: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, КЧ45-6, КЧ50-4, КЧ60-3, КЧ63-2. В обозначение марки входят буквы КЧ (ковкий чугун), затем число — минимально допустимый предел прочности при растяжении (кгс/мм^2), второе число — относительное удлинение (%).

Свойства серых чугунов зависят от свойств металлической основы, вида и количества графитных включений.

Графит имеет низкие показатели механических свойств, и включения его можно условно рассматривать как пустоты и трещины. Чем больше графита, крупнее графитные включения, тем ниже механические свойства чугуна и особенно прочность при растяжении и изгибе. Прочность при сжатии и твердость чугуна зависят в основном от металлической основы и мало отличаются от сталей.

В некоторых случаях графитные включения полезны благодаря смазывающему действию графита. Такой чугун легче обрабатывается резанием, чем сталь, стружка становится ломкой, когда резец доходит до графитных включений.

Подобно другим железоуглеродным сплавам, чугуны содержат постоянные примеси кремния, марганца, серы и фосфора в больших количествах, чем в сталях. Эти примеси оказывают значительное влияние на графитизацию, структуру и свойства чугунов.

В чугуны часто вводят также медь, алюминий, титан, хром, никель. Эти элементы оказывают влияние на процесс графитизации. Подобно сталям такие чугуны называют легированными.

Серые чугуны применяют при изготовлении опорных элементов для ферм, железобетонных балок и колонн, тубингов в метро, при производстве многих других строительных конструкций, а также находят широкое применение в деталях машин, не подвергающихся большим растягивающим напряжениям и ударным нагрузкам.

19.2.2. ПОЛУЧЕНИЕ СТАЛИ

Переработка передельного чугуна осуществляется с целью получения стали в результате освобождения его от некоторой части углерода методом окисления. При этом сталь может производиться тремя методами: конверторным — продувкой расплавленного чугуна сжатым воздухом или кислородом в больших грушевидных сосудах — конверторах с различной внутренней огнеупорной футеровкой (рис. 19.3); мартеновским — в печах Сименса-Мартена (рис. 19.4) с регенерацией тепла отходящих газов; электроплавкой — в электродуговых, индукционных или высокочастотных печах (рис. 19.5). При плавке в мартеновских печах или при электроплавке добавляется в расплавленный чугун железная руда или скрап (отходы ржавого железа, железный лом). Кислород добавляемых оксидов также выжигает примеси, а железо понижает содержание углерода в общей массе металла. Можно переплавлять в печи и железный лом, превращая его в продукт, годный к вторичному употреблению, что экономически весьма выгодно. При использовании железа, спеченного в куски при бездоменном производстве, сталь получают насыщением его углеродом с помощью переплавки с чугуном. Полученные тем или иным методом углеродистые стали с содержанием углерода до 1,3% широко используют в машиностроении, на транспорте, в строительстве и т. п.

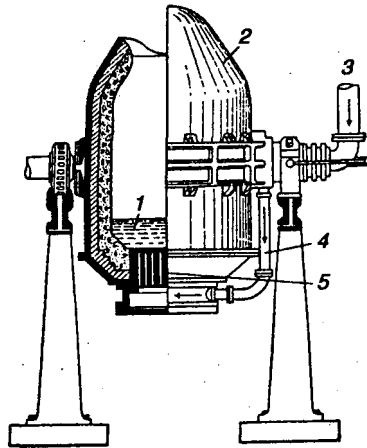


Рис. 19.3. Конвертор для выплавки стали из чугуна:
1 — чугун; 2 — набойка; 3 — воздух; 4 — дутье; 5 — фурмы для подачи воздуха в металл

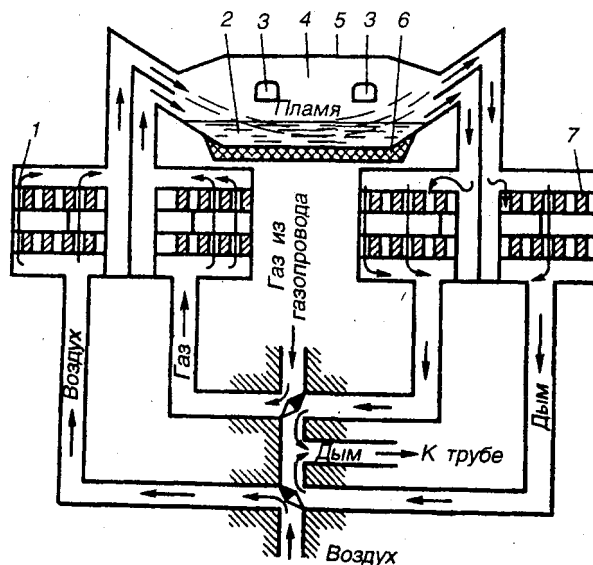


Рис. 19.4. Схема мартеновской печи
1, 7 — регенераторы; 2 — расплавленные шлак и металл; 3 — завалочные окна; 4 — рабочее пространство; 5 — свод; 6 — под

При производстве стали часто добавляют в печь легирующие вещества (металлы), получая специальные сорта стали с необходимыми свойствами, например хромоникелевую (нержавеющую) сталь и др. Упрочненные низколегированные стали, содержащие хром, никель, марганец, кремний, выпускают в качестве массовых технических материалов, тогда как специальные сорта с повышенной прочностью, жаростойкостью, коррозионной стойкостью и другими улучшенными свойствами содержат увеличенное количество легирующих компонентов. Нередко в качестве легирующего компонента выступает и железо в сплавах на основе алюминия, меди и других металлов.

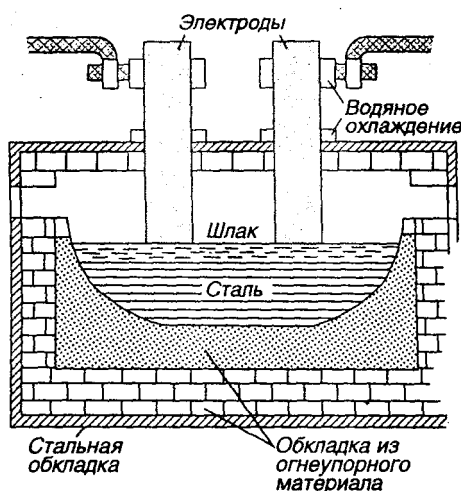


Рис. 19.5. Схема электрической печи для выплавки специальных сталей

В конверторах выплавляется более 50% в мире стали, причем эта доля стали, выплавляемой высокопроизводительными методами (конвертор и электроплавка), имеет тенденцию к непрерывному увеличению, тогда как доля мартеновской выплавки постепенно уменьшается. У нас в стране на долю углеродистых сталей приходится около 90%, а легированных — 10%. Качество тех и других обусловлено в основном их составом и структурой как железоуглеродистого сплава. В нем железо образует термодинамически неустойчивое химическое соединение с углеродом Fe_3C , называемое цементитом. Значительная часть железа находится в чистом виде с температурой плавления 1539°C . Железо имеет четыре полиморфные модификации: $\alpha\text{-Fe}$, $\beta\text{-Fe}$, $\gamma\text{-Fe}$ и $\delta\text{-Fe}$. Практическое значение имеют модификации $\alpha\text{-Fe}$ и $\gamma\text{-Fe}$. Переход железа из одной модификации в другую происходит при определенных критических температурах. Модификация $\alpha\text{-Fe}$ имеет кубическую объемно-центрированную кристаллическую решетку, $\gamma\text{-Fe}$ — кубическую гранецентрированную кристаллическую решетку. Переход железа из одной аллотропической формы в другую схематически показан на кривой охлаждения (рис. 19.6). В процессе охлаждения расплавленного железа при температуре 1535°C образуется площадка, характеризующая формирование кристаллической модификации $\delta\text{-Fe}$; при температуре 1392°C происходит полиморфная модификация $\delta\text{-Fe}$ в модификацию $\gamma\text{-Fe}$, которая при температуре 898°C переходит в модификацию $\beta\text{-Fe}$; при температуре 768°C модификация $\beta\text{-Fe}$ переходит в модификацию $\alpha\text{-Fe}$. Изучение этих четырех форм существования кристаллического железа показало, что в модификации $\gamma\text{-Fe}$ имеется межатомное расстояние в кристаллической решетке, меньшее, чем в модификации $\beta\text{-Fe}$, и поэтому переход $\gamma\text{-Fe}$ в $\beta\text{-Fe}$ сопровождается увеличением объема кристалла. Отмечено, что модификация $\alpha\text{-Fe}$ обладает магнитными свойствами (ферромагнит), тогда как модификация $\beta\text{-Fe}$ этими свойствами почти не обладает, хотя кристаллические решетки их сходны между собой.

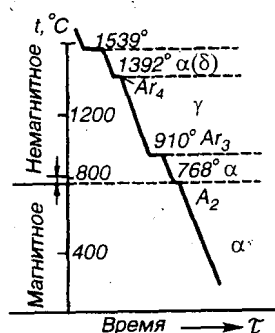


Рис. 19.6. Кривая охлаждения железа

Большое значение для практики имеет свойство модификации γ -Fe растворять до 2,14% углерода при температуре 1147°C с образованием твердого раствора и с внедрением атомов углерода в кристаллическую решетку. При повышении и понижении температуры растворимость углерода в модификации γ -Fe уменьшается. Твердый раствор углерода и других элементов (азот, водород) в модификации γ -Fe называется *аустенитом* (по имени ученого Р. Аустена), почти в 100 раз меньше углерода может раствориться в модификации α -Fe, причем твердые растворы углерода и других элементов в модификации α -Fe называют *ферритом*.

Кроме твердых растворов в железе, в железоуглеродистых сплавах может быть, как отмечено выше, химическое соединение железа с углеродом — карбид железа Fe_3C . Это соединение, называемое *цементитом*, содержит 6,67% углерода, имеет сложное кристаллическое строение с плотноупакованной ромбической кристаллической решеткой. В сплавах цементит является метастабильной фазой. Его температура плавления равна примерно 1500°C. Он хорошо растворим в модификации γ -Fe, меньше — в δ -Fe и совсем мало — в α -Fe.

Феррит отличается мягкостью и пластичностью, его прочность сравнительно невысока (предел прочности при растяжении 250 МПа, относительное удлинение 50%, твердость HB составляет 800 МПа). Аустенит также имеет высокую пластичность, низкий предел прочности при растяжении. Твердость аустенита HB 1700— 2200 МПа. Цементит обладает низкой пластичностью и высокой твердостью HB, равной 10000 МПа, хрупкий.

19.3. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Более полную систему железоуглеродистых сплавов и процессов формирования структур сталей и чугунов в наглядной форме представляют на диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов. В частности, наглядно видно, как изменяется растворимость цементита в железе в зависимости от температуры.

На диаграмме (рис. 19.7) даны фазовый состав сплавов и их структура в интервале по составу от чистого железа до цементита (6,67% C). На оси абсцисс показано содержание углерода (C) в процентах по массе, на параллельной ей линии — содержание цементита, на оси ординат — температура.

Точка *A* на диаграмме отмечает температуру плавления чистого железа (1539°C), а точка *D* — цементита (1500°C). Линия *ABCD* является линией ликвидуса, а *AHIECF* — линией солидуса. Выше линии солидуса существует жидкий сплав (Ж) — жидкий раствор углерода в железе.

При охлаждении жидких сплавов сначала происходит кристаллизация, а затем после отвердевания — фазовые структурные превращения вследствие полиморфизма железа и изменения растворимости углерода в аустените и феррите. Все эти изменения наблюдаются на диаграмме железо — углерод, причем эту сложную диаграмму при ее изучении разделяют на части, рассматривая каждую из них как двухкомпонентную диаграмму.

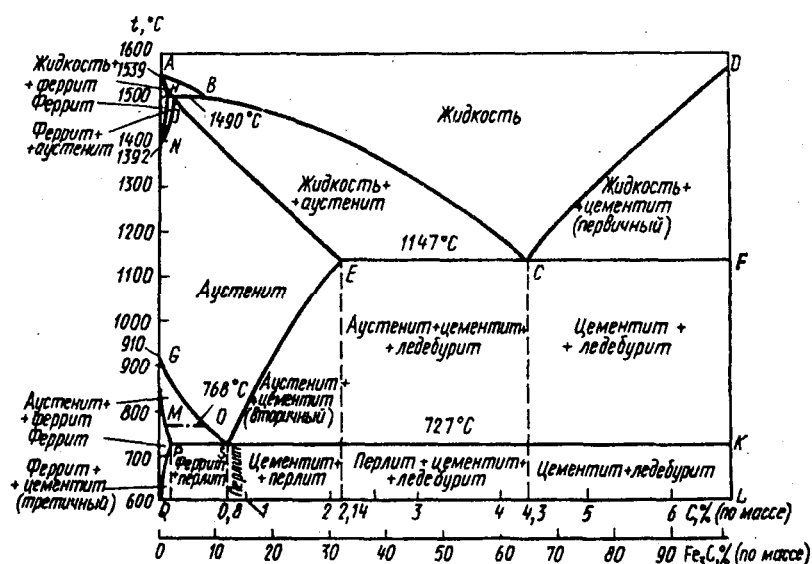


Рис. 19.7. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

По содержанию углерода железоуглеродистые сплавы разделяют на стали, содержащие до 2,14% углерода, и чугуны с содержанием углерода более 2,14%. Принятая граница между сталями и чугунами соответствует наибольшей растворимости углерода в аустените.

Стали по содержанию углерода разделяют на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.

Доэвтектоидными называют стали, содержащие 0,02—0,8% углерода. Весьма малоуглеродистые сплавы, содержащие до 0,02% (на диаграмме точка *P*), называют техническим железом.

Кристаллизация доэвтектоидных сталей происходит между линиями *ABC* и *AHE*, и в этом интервале они состоят из жидкой фазы и феррита или аустенита. После окончания кристаллизации доэвтектоидные стали состоят из аустенита, не изменяющегося при охлаждении вплоть до линии *GOS*, именуемой линией верхних критических точек и обозначаемой через *Ac₁*. При дальнейшем охлаждении сталей образуются зерна феррита, а количество аустенита уменьшается.

На линии PSK при температуре 727°C происходит эвтектоидное (перлитное) превращение аустенита (точка S). Последний распадается, выделяя феррит и цементит, которые образуют эвтектоидную мельчайшую смесь — перлит, содержащий 0,8% углерода. Линия PSK называется линией нижних критических точек или линией перлитных превращений и обозначается через A_{c1} .

Структура перлита состоит из пластинок феррита и цементита, а на микрошлифе имеет вид перламутра (отсюда название перлита). После полного охлаждения доэвтектоидные стали состоят из феррита и перлита. С увеличением содержания углерода в стали снижается количество феррита, но возрастает содержание перлита.

Заэвтектоидными называют стали, содержащие 0,8—2,14% углерода. При температурах выше линии SE находится в стали только аустенит. С охлаждением эта структурная составляющая стали становится насыщенной углеродом и из нее выделяется вторичный цементит (ниже линии SE). От температуры 727°C и ниже заэвтектоидные стали состоят из перлита и вторичного цементита.

Чугуны по содержанию углерода разделяют на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические.

Доэвтектическими называют чугуны, содержащие 2,14—4,3% углерода. На диаграмме они располагаются в области между линиями BC и EC; состоят из двух фаз — жидкости и кристаллов аустенита. При температуре эвтектики, равной 1147°C, оставшийся жидкий сплав кристаллизуется с превращением в эвтектику — ледебурит, которая в момент образования состоит из аустенита и цементита. Доэвтектические чугуны между линиями EC (1147°C) и PSK (727°C) состоят из аустенита, цементита и ледебурита. При температуре ниже 727°C аустенит превращается в перлит, а доэвтектические чугуны содержат перлит, цементит и ледебурит. С увеличением количества углерода в чугунах уменьшается содержание перлита и увеличивается — ледебурита.

Эвтектическим называют чугун при содержании углерода в количестве 4,3% (точка C); он кристаллизуется при постоянной температуре 1147°C с образованием эвтектики — ледебурита. Эвтектический чугун и при обычной температуре состоит из ледебурита.

Заэвтектическими называют чугуны с содержанием углерода 4,3—6,67%. Они кристаллизуются по диаграмме состояния сплавов между линиями CD и CF с образованием в жидком сплаве кристаллов первичного цементита. При дальнейшем охлаждении оставшаяся жидкость затвердевает, образуя эвтектику — ледебурит. Заэвтектические чугуны после отвердевания состоят из цементита и ледебурита. При температуре 727°C входящий в ледебурит аустенит распадается с образованием перлита; при дальнейшем снижении температуры заэвтектические чугуны состоят из цементита (в виде пластин) и ледебурита. С увеличением количества углерода возрастает и содержание цементита.

19.4. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

Углеродистые стали имеют сложный химический состав. Кроме основных компонентов — железа (97—99,5%) и углерода — они содержат примеси никеля, хрома, кремния, марганца, серы, фосфора, кислорода, азота, водорода или других элементов. Углеродистыми являются стали, которые содержат мало примесей, но достаточно — углерода. Углерод и примеси оказывают непосредственное влияние на структуру и свойства стали.

Как уже отмечалось, доэвтектоидные стали состоят из феррита и перлита, эвтектоидные — из перлита и вторичного цементита. После медленного охлаждения сталь при обычной температуре состоит из двух фаз — феррита и цементита, причем количество феррита уменьшается, а количество цементита повышается пропорционально содержанию углерода. Присутствие этих фаз влияет на твердость стали, так как твердость цементита (по Бриннелю) составляет 8000—8500 МПа, у феррита 800—900 МПа. Твердые частицы цементита затрудняют движение дислокации и тем препятствуют деформациям, понижают пластичность и вязкость стали. С увеличением содержания углерода в стали повышается ее твердость (HB), предел прочности при растяжении (σ_B) и предел текучести ($\sigma_{0,2}$), уменьшаются пластичность (относительные удлинение δ , сужение α) и ударная вязкость ψ (рис. 19.8), понижаются плотность, теплопроводность и магнитная проницаемость, но возрастает ее электросопротивление.

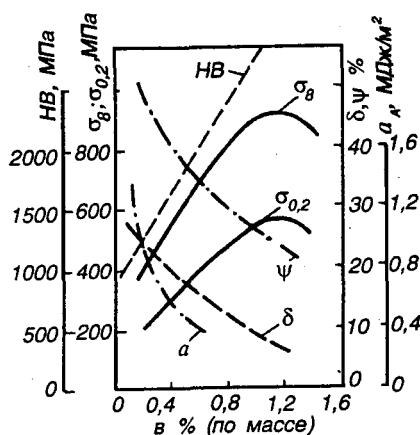


Рис. 19.8. Изменение свойств стали с увеличением содержания углерода

На качество стали влияют примеси — марганец, кремний, сера, фосфор, а также газы (азот, кислород и др.).

Марганец содержится в качестве примеси во всех углеродистых сталях примерно в одинаковом количестве, но не более 0,8% по массе. Его вводят в стали в виде ферромарганца, т. е. сплава железа с марганцем, для раскисления при плавке с целью устранения вредных примесей окиси железа FeO, ухудшающих качество стали.

Раскисление состоит в том, что марганец соединяется с кислородом окиси железа, образует оксид марганца MnO, основная часть которого, выделяясь из стали, переходит в отделяющийся от стали шлак: $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnO}$. Но некоторая доля оксида марганца остается в стали, а часть марганца растворяется в феррите и цементите, также оставаясь в стали. Марганец способствует устранению вредных примесей сернистых соединений железа. В результате раскисления улучшаются свойства, в частности повышается прочность стальных горячекатаных изделий.

Кремния в углеродистой стали содержится обычно не более 0,35—0,5%. Его вводят как примесь в сталь в виде ферросилиция, т. е. сплава железа с кремнием, с той же целью, что и марганец, — для раскисления при плавке: $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$. Основная часть SiO₂ удаляется в виде шлака, но часть оксида кремния, не успевшая всплыть со шлаком,

остается в стали. Остается и часть кремния, растворившаяся в феррите. Раскисление стали кремнием улучшает ее свойства, повышает плотность слитка, так как кремний дегазирует сталь.

Сера попадает в чугуны и стали из руд и печных газов (газ SO_2 — продукт горения топлива). Она является вредной примесью и ее допускается в стали не более 0,035—0,06%. Сера образует с железом сульфид железа FeS с появлением легкоплавкой и хрупкой эвтектики (эвтектической смеси $\text{Fe} + \text{FeS}$). Последняя придает стали хрупкость при нагревании ее до 800°C и выше, т. е. до температуры красного каления. Такое явление называют красноломкостью. Сталь, содержащая повышенное количество серы, не поддается горячей обработке давлением вследствие красноломкости. При обработке же стали прокатом или ковкой с нагреванием до $1000\text{—}2000^\circ\text{C}$ эвтектика расплавляется, вследствие чего нарушается связь между зернами стали. Возникают трещины и надрывы в местах расположения эвтектик. При введении в сталь марганца вредное влияние серы, красноломкость практически исключаются, так как марганец имеет более сильное химическое сродство с серой, чем железо, и образует с ней тугоплавкий сульфид марганца MnS .

Сернистые включения значительно понижают механические свойства стали, улучшают ее коррозионную стойкость и свариваемость, облегчают обработку стали резанием.

Фосфор содержится в железной руде, флюсах, топливе и является вредной примесью в стали. Его содержание ограничивается не более чем 0,025—0,045%. Он растворяется в феррите, искажая его кристаллические решетки, вследствие чего резко повышает температуру перехода стали в хрупкое состояние, т. е. вызывает так называемую хладноломкость стали.

Фосфор повышает прочность и уменьшает пластичность и вязкость стали. Он неоднородно распределяется в стальном слитке (ликвация), вследствие чего некоторые средние участки стального слитка содержат повышенное количество фосфора, обладают значительно пониженной вязкостью.

В стали содержится небольшое количество газов (азота, кислорода и др.), ухудшающих ее свойства.

Содержание неметаллических включений и газов в стали значительно уменьшается при выплавке или разливе ее в вакууме.

19.5. УГЛЕРОДИСТЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Стали, применяемые в строительстве, называют конструкционными, причем они могут быть углеродистыми и легированными; содержат обычно не более 0,5—0,6% С, обладают высокими механическими свойствами. Их разделяют на стали общего назначения и качественную сталь. В зависимости от способа раскисления с уменьшением содержания кислорода сталь разделяют на кипящую, спокойную и полуспокойную.

Кипящая сталь обладает высокой пластичностью. Она более хладноломка и способна к старению, хуже сваривается, чем спокойная и полуспокойная стали. Качество кипящей стали ниже качества спокойной и полуспокойной, она дешевле их вследствие небольшого объема отходов при ее производстве.

Спокойная сталь содержит кислород в растворенном состоянии или в виде оксида железа FeO, является красноломкой и поэтому ее нельзя обрабатывать давлением. Для уменьшения содержания кислорода в стали ее раскисляют марганцем, кремнием и др. Она остывает в изложнице с уменьшением объема, почти не выделяет газов, вследствие чего ведет себя «спокойно». В верхней части слитка усадочную раковину и рыхлость как дефектную часть отрубают или отрезают.

Полуспокойная сталь содержит часть растворенного кислорода, вследствие чего происходит непродолжительное «кипение» стали. Ее раскисляют марганцем и алюминием. По качеству она занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной.

Углеродистые конструкционные стали общего назначения при плавке меньше очищают от вредных примесей, чем качественные стали, и поэтому они содержат больше серы и фосфора. Из них отливают крупные слитки. Применяют для изготовления горячекатаного проката — полуфабриката (балок, швеллеров, уголков, листов, поковок, прутков), строительных конструкций, в машиностроении и т. д.

В зависимости от назначения и свойств их разделяют на три группы: А, Б и В.

Стали группы А (табл. 19.1) поставляют по механическим свойствам без гарантии химического состава. Эти стали обозначают буквами Ст (сталь) и цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6 в порядке увеличения содержания углерода, а значит в порядке повышения прочности и уменьшения пластичности. Применяют главным образом в состоянии поставки без горячей обработки (ковки, сварки и др).

Таблица 19.1. Механические свойства углеродистых сталей общего назначения группы А

Марки	σ_s , МПа	σ_b , МПа	δ , %
Ст0	Не менее 310	—	20—23
Ст1кп	310—390	—	32—35
Ст1пс, Ст1сп	310—410	—	31—34
Ст2кп	320—410	185—215	30—35
Ст2пс, Ст2сп	330—430	195—225	29—32
Ст3кп	360—460	195—235	24—27
Ст3пс, Ст3сп	370—480	205—245	23—26
Ст3Гпс	370—90	205—245	23—26
Ст3Гсп ¹	390—570	245	24
Ст4кп	400—510	225—255	22—25
Ст4пс, Ст4сп	410—530	235—265	21—24
Ст5сп, Ст5пс	500—630	255—285	17—20
Ст5Гпс	450—590	255—285	17—20
Ст6пс, Ст6сп	Не менее 590	295 315	12—15

¹ Буква Г указывает на повышенное содержание Mn.

В написании марок буквы обозначают: Ст – сталь; кп – кипящая сталь; пс – полуспокойная сталь; сп – спокойная сталь.

Стали группы Б поставляют с гарантированным химическим составом. В начале обозначения марки этих сталей стоит буква Б, например: Бст0; Бст1кп; Бст1пс; Бст1сп и т. д.

Стали группы Б подвергаются горячей обработке (ковке, штамповке и др.), поэтому необходимы данные по химическому составу, т. е. содержанию С, Мн, Si и др.

В группу В входят стали повышенного качества, которые поставляют с гарантированными механическими свойствами и гарантированным составом. В начале обозначения каждой марки таких сталей ставят букву В. Их применяют для сварных конструкций, в мостостроении, судостроении и т. д.

Углеродистые качественные стали имеют более высокие показатели качества, чем стали общего назначения, а также отличаются химическим составом. Их применяют для сварных конструкций, в машиностроении.

19.6. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Легированными или специальными называют стали, в которые вводят легирующие элементы (от греческого «лега» — сложное). Легирующими называют элементы, специально вводимые в сталь для изменения ее структуры и свойств. К ним относятся: Cu, Al, Si, Ti, V, Cr, Nb, W, Mo, Ni, Mn, Co и др.

Легированием повышают коррозионную стойкость сталей, придают им стойкость в условиях низких и высоких температур и давлений, повышают прочность, твердость, износостойкость и др. Отдельные легирующие элементы повышают у стали: Cu, Si, Cr, Mo, Ni и др. — коррозионную стойкость; Si, Cr, Mo, W, Mn, Ni и др. — твердость и прочность; V, Co, Ni — вязкость; Cr, Mn, Ni — сопротивление истиранию и т. д.

Легирующие элементы в стали могут находиться в свободном состоянии (очень редко), в виде твердых растворов замещения в феррите, аустените и цементите (легированный цементит), самостоятельных специальных карбидов, химических соединений с железом или друг с другом (интерметаллических) и с неметаллами (оксидов, сульфидов и др.). Более всего легирующие элементы образуют твердые растворы и карбиды. Большинство легирующих элементов растворяются в феррите и аустените с образованием твердых растворов замещения.

Легирующие элементы разделяют на две группы — не образующие карбидов и карбидообразующие.

Железо и вводимые в сталь легирующие карбидообразующие элементы Mn, Cr, Mo, W, Ni, V и др. (они расположены в порядке повышения степени сродства к углероду) образуют с углеродом карбиды — Mn_3C , Cr_7C_3 , Mo_2C , W_2C , NiC , VC и др., повышающие твердость и прочность стали. Железо имеет более низкую степень сродства к углероду, чем легирующие элементы.

В легированных сталях содержатся три фазы: легированные феррит, аустенит и цементит. Легированные феррит и аустенит являются твердыми растворами легирующих элементов соответственно в модификациях α -Fe и γ -Fe, а легированный цементит является цементитом, в котором часть атомов железа замещена атомами легирующего элемента.

Преимущества легированных сталей особенно полно проявляются после термической обработки.

Легированные стали классифицируют в зависимости от общего содержания легирующих элементов: низколегированные содержат до 2,5%, среднелегированные 2,5—10% и высоколегированные — более 10% легирующих элементов; по назначению — конструкционные (машиностроительная, строительная), с особыми свойствами (коррозионностойкие или нержавеющие, жаростойкие, жаропрочные и др.) и инструментальные. Легированные стали маркируют с обозначением каждой марки стали буквой и числом.

Низколегированные строительные стали применяют для изготовления строительных стальных конструкций (ферм, мостов, нефтепроводов, газопроводов и др.) и арматуры для железобетонных конструкций.

Стальные конструкции обычно являются сварными и поэтому для них применяют хорошо свариваемые малоуглеродистые (менее 0,22—0,25% C) низколегированные стали повышенной прочности с добавлением более дешевых легирующих элементов — кремния и марганца.

Низколегированные стали повышенной прочности обладают высокой пластичностью ($\delta = 23$ —25%) и ударной вязкостью, повышенной прочностью; предел прочности при растяжении 550—600 МПа, предел текучести 350—450 МПа, а после термической обработки эти показатели становятся еще выше.

Кроме низколегированных сталей повышенной прочности применяют и низколегированные стали высокой прочности, имеющие предел текучести более 450 МПа. Например, сталь марки 18Г2АФ имеет ферритно-перлитную структуру со значительно

измельченными зернами вследствие наличия в ней нитридов ванадия, что значительно повышает предел текучести (примерно выше на 100 МПа).

В железобетонных конструкциях применяют простые углеродистые стали и низколегированные арматурные стали в виде проволоки и стержней гладких или периодического профиля. Ненапряженные железобетонные конструкции, в которых сталь испытывает небольшие напряжения, армируют простыми углеродистыми сталями и низколегированными сталями марок 35ГС, 18Г2С и 25Г2С.

Предварительно напряженные конструкции, в которых сталь подвергается большим напряжениям, армируют высокопрочными среднеуглеродистыми, высокоуглеродистыми и низколегированными (марок 45С, 80С, 35ГС, 45ГС, 20ХГ2С, 20Х2Г2Т) сталями в горячекатаном или термически упрочненном состоянии путем закалки и отпуска.

Коррозионностойкие (нержавеющие) стали. При воздействии внешней среды может происходить разрушение металла, называемое коррозией. Коррозионностойкими называют стали, обладающие высокой стойкостью против коррозии в агрессивных средах. Наиболее подвержены коррозии в различных средах (на воздухе, в воде и др.) железоуглеродистые и низколегированные стали. В этих случаях на поверхности металлов образуется неплотная оксидная пленка, не предохраняющая металл от дальнейшей коррозии.

При введении некоторых легирующих элементов в сталь скачкообразно повышается ее коррозионная стойкость, а при определенном количестве легирующего элемента возможно получение стали, практически не поддающейся коррозии. Название нержавеющей стали дается в зависимости от введенного в нее легирующего элемента.

Наиболее широко применяются хромистые нержавеющие стали, а также хромоникелевые. В них главным легирующим элементом является хром. Хромистые содержат 0,08—0,40% С и 13—17% Cr и обладают полной коррозионной стойкостью на воздухе, в воде и некоторых кислотах, щелочах и солях благодаря тому, что на поверхности стали образуется плотная тонкая пленка оксида хрома, защищающая сталь от коррозии.

Сталь, содержащая менее 12% Cr, подвержена коррозии. Обычные марки хромистых нержавеющих сталей: 08Х13, 12Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 12Х17, 08Х17Т, 14Х17Н2 (содержит 1,5—2,5% Ni), 15Х25Т, 15Х28.

Высокую коррозионную стойкость имеют и хромоникелевые стали. В качестве основных легирующих элементов в них вводят хром и никель. Их получают введением никеля в хромистую сталь, содержащую 0,12—0,14% С и 17—20% Cr. С введением никеля хромистая сталь приобретает аустенитную структуру, что уменьшает склонность зерен к росту, повышает коррозионную стойкость, предотвращает хладноломкость, улучшает механические свойства. Марки хромоникелевых нержавеющих сталей: 12Х18Н8, 12Х18Н9Т, 10Х14Г14НТ и др.

Коррозионностойкие стали применяют для изготовления строительных изделий и конструкций, эксплуатируемых в грунтовых и морских водах, газах и других агрессивных средах.

Жаростойкие и жаропрочные стали. В различных областях техники все шире используют высокие температуры и давления. Между тем при высоких температурах металлы ведут себя иначе, чем при обычных или даже несколько повышенных (300—350°C) температурах.

Жаростойкими (окалиностойкими) называют стали, стойкие против химического разрушения (окисления) их поверхности в газовой среде при температурах выше 550°C, работающие длительное время в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Окалиностойкость стали повышают легированием ее элементами, обладающими большим сродством к кислороду, чем железо, вследствие чего в благоприятном направлении изменяются состав и строение окалины.

При окислении стали, легированной алюминием, кремнием или хромом, имеющими большое сродство к кислороду по сравнению с железом, на ее поверхности образуется

тонкая плотная пленка оксидов Al_2O_3 , SiO_2 или Cr_2O_3 , затрудняющая дальнейшее окисление.

С повышением содержания данных легирующих элементов повышается окалиностойкость стали, что позволяет нагревать ее до более высокой рабочей температуры.

Предельная температура эксплуатации жаростойких сталей составляет 900—1150°C при содержании хрома 16—27%, если действие нагрузки кратковременное. При высокой температуре металл может иметь высокую прочность, а при длительном ее действии прочность становится низкой.

Жаростойкие стали содержат 0,08—0,50% С; они легируются главным образом хромом, а также молибденом, вольфрамом, ванадием.

Легированные инструментальные стали и твердые сплавы. Легированные инструментальные стали применяют в тех случаях, когда углеродистую сталь нельзя применять ввиду недостаточной ее стойкости.

Тонкое лезвие (кромка) режущего инструмента работает под большим удельным давлением, в результате чего оно затупляется, изнашивается. Для обеспечения длительной надежной работы оно должно изготавливаться из металла с твердостью выше 60HRC. При больших скоростях резания и особенно твердых металлов кромка режущего инструмента значительно нагревается (до красного каления). В этом случае режущая кромка должна быть из стали, обладающей так называемой *красностойкостью* (теплостойкостью), т. е. способностью сохранять высокую твердость при продолжительном нагревании.

У низколегированных инструментальных сталей высокая твердость сохраняется до температуры 250°C, у высоколегированных — до 600°C.

Марки низколегированных инструментальных сталей: X06,85XФ, 9XC, XГ, XBГ, XГCBФ, B1 и др.

Низкоуглеродистые инструментальные стали применяют для изготовления режущих инструментов, работающих в относительно легких условиях, и измерительных инструментов.

Высоколегированные (быстрорежущие) стали легируют большим количеством карбидообразующих элементов — ванадием, вольфрамом, молибденом, хромом. Возникают высокотвердые специальные карбиды, которые при закалке переходят в твердый раствор.

Эти стали обладают высокой твердостью (горячей твердостью) и высокими режущими свойствами в горячем состоянии и красностойкостью, способностью сохранять высокую твердость во времени. Из них изготавливают режущие инструменты для работы при высоких скоростях резания, когда выделяется много теплоты и инструменты сильно нагреваются. Основные марки быстрорежущих сталей: P18, P6M5, P3M3Ф3, P6M5Ф2KB и др.

Быстрорежущие стали обозначают буквой Р (рапиц-скорость); число за буквой Р — содержание вольфрама в процентах (буква В не пишется).

После отжига стали всех марок состоят из α -твердого раствора и карбидов.

Твердые металлокерамические сплавы и керметы. Твердые сплавы изготавливают на основе тугоплавких карбидов. Они обладают высокими прочностью, твердостью, износостойкостью, коррозионной устойчивостью и жаростойкостью. Разогрев кромки режущего инструмента из быстрорежущей стали допустим только до 650°C, а из твердых сплавов разогрев возможен до 800—1000°C.

Твердые металлокерамические сплавы готовят способом порошковой металлургии. Порошки карбидов вольфрама и титана смешивают с кобальтом или никелем (связующим веществом), прессуют, и полученные изделия обжигают при высокой температуре (1500—2000°C) до спекания. Обожженные изделия состоят из мельчайших зерен карбидов, связанных кобальтом. Полученные изделия обладают высокой твердостью (HRC до 85) вследствие содержания в них 90—95% карбидов и сохраняют ее вплоть до температуры

1000°C. Марки металллокерамических сплавов: ВК2, ВК3, ВК6, ВК8, Т5К10, Т14К8, Т15К6, Т3ОК6, Т60К6.

Из металллокерамических сплавов готовят режущие пластины, резцы, сверла, фрезы и др.; их применяют для скоростного резания металлов.

Керметы, т. е. керамико-металлические порошковые сплавы, готовят методом порошковой металлургии. Из порошков неметаллических материалов (карбидов, оксидов, нитридов, силицидов, боридов) и металлов (кобальта, никеля, хрома и др.), являющихся связующим веществом, получают изделия с высокими показателями твердости, коррозионной стойкости, жаростойкости и жаропрочности.

19.7. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Целью термической обработки стали является изменение ее структуры и свойств. При термической обработке сталь нагревают обычно до температур, при которых образуется аустенит, и охлаждают. При этом происходят фазовые превращения, переход менее устойчивой структуры, полученной предшествующей обработкой, в более устойчивую и равновесную.

При нагревании выше PSK образуются зародыши кристаллов аустенита и его мелкие зерна (см. рис. 19.7). При повышении температуры или продолжении выдержки при данной температуре зерна аустенита растут. При охлаждении размеры зерен не изменяются. Аустенит находится в метастабильном состоянии, и в нем происходят превращения, он распадается с образованием более стабильных структур; при распаде в области повышенных температур образуется структура из феррита и цементита.

При термической обработке значительно изменяются свойства стали, причем наибольшее значение имеет изменение механических свойств.

В зависимости от требований к стальным полуфабрикатам (отливкам, поковкам, прокату и др.) и изделиям применяют следующие основные виды термической обработки: отжиг, нормализацию, закалку и отпуск.

Отжигом называют термическую обработку стали, получившей неустойчивое состояние в предыдущей обработке, путем нагревания выше линий A_{c3} или A_{c1} и медленного охлаждения вместе с печью, что приводит ее в более устойчивое состояние.

При нагревании стали выше линии A_{c3} происходит полная ее перекристаллизация с образованием аустенита, а при медленном охлаждении аустенит распадается и превращается в перлитовые структуры.

Отжиг стали проводят для устранения некоторых дефектов ее предыдущей горячей обработки (литья,ковки и др.) или для подготовки ее структуры к следующим операциям (закалке, обработке резанием и др.). Часто отжиг является окончательной термической операцией. Различают отжиг 1-го и 2-го рода.

Отжиг 1-го рода проводят с целью снятия остаточных напряжений и искажения кристаллической решетки, уменьшения неоднородности стали, полученных в результате предшествующей обработки. Он осуществляется при температурах ниже или выше фазовых превращений ($650—1200^{\circ}\text{C}$). Ему подвергают стальные отливки, детали, обработанные резанием, сварные изделия, холоднодеформированную сталь и др.

При отжиге 2-го рода сталь нагревают до температуры выше линий A_{c3} или A_{c1} , выдерживают при данных температурах и медленно охлаждают. При этом в стали протекают фазовые превращения — перекристаллизация, в результате которых структура . практически становится близкой к равновесной. При фазовой перекристаллизации происходит измельчение зерен, снимаются внутренние напряжения, уменьшается структурная неоднородность, что и обуславливает повышение пластичности и вязкости. После отжига сталь имеет низкие прочность и твердость, что облегчает обработку резанием среднеуглеродистой и высокоуглеродистой стали. Отжигу 2-го рода подвергают отливки, поковки и прокат для повышения пластичности и вязкости.

Отжиг 2-го рода является в производстве обычно промежуточной операцией, а для многих крупных отливок — окончательной термической обработкой.

Нормализацию (нормализационный отжиг) доэвтектоидных сталей производят нагреванием на 50°C выше A_{c3} , а заэвтектоидных — на 50°C выше A_{cm} , недолго выдерживают при этих температурах для прогрева стали и завершения фазовых превращений и охлаждают на воздухе. Происходит полная фазовая перекристаллизация и устраняется крупнозернистая структура, полученная сталью при литье, прокатке, ковке или штамповке, в результате чего улучшаются ее свойства. При быстром охлаждении на воздухе аустенит распадается при более низких температурах, чем при медленном охлаждении стали вместе с печью при отжиге, что приводит к образованию более

дисперсной ферритно-цементитной структуры и на 10—15% повышает прочность и твердость среднеуглеродистой и высокоуглеродистой стали по сравнению с отжигом. Нормализация экономнее отжига, так как сталь охлаждается за пределами печи.

Закалка стали. При закалке доэвтектоидные стали нагревают до температур на 30—50°C выше A_{c3} , а заэвтектоидные — на 30—50°C выше A_{c1} , выдерживают при этих температурах для завершения фазовых превращений и с большой (выше критической) скоростью охлаждают, точнее переохлаждают до низких температур, когда невозможны диффузионные процессы. Углеродистые стали чаще охлаждают в воде, а легированные — в минеральном масле или других средах.

В результате закалки значительно повышается твердость стали. Закалка является промежуточной, не окончательной термической операцией. После закалки сталь подвергают отпуску для уменьшения внутренних напряжений и хрупкости, возникших в результате закалки, и для придания стали необходимых механических свойств.

Доэвтектоидные стали, имеющие структуру феррит + перлит, при нагревании на 30—50°C выше A_{c1} приобретают структуру аустенита, который при непрерывном быстром охлаждении превращается в мартенсит — пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -Fe.

Содержание углерода в мартенсите может достигать до 2,14%, т. е. как и в исходном аустените, в то время как в равновесном состоянии растворимость углерода в α -Fe при 20°C не более 0,002%. Применяют следующие основные способы закалки: непрерывную, прерывистую и ступенчатую.

Непрерывная закалка — с полным охлаждением в одном охладителе (в воде или минеральном масле) — самая простая и применяется наиболее широко. Ее применяют для простых изделий из углеродистых и легированных сталей.

Прерывистая закалка или закалка в двух средах: изделие быстро охлаждают в воде до температуры несколько выше точки M_n (температуры начала мартенситного превращения), быстро переносят в среду с меньшей скоростью охлаждения (минеральное масло, воздух), в которой они охлаждаются до температуры 20°C. При охлаждении во второй среде в стали уменьшаются внутренние напряжения. Этим способом закаляют инструменты из высокоуглеродистой стали.

Ступенчатая закалка заключается в следующем. Стальное изделие охлаждают в среде расплавленных солей: 45% NaNO_3 + 55% KNO_3 , а также в расплавленных щелочах: 20% NaOH + 80% KOH , температура которых несколько выше M_n (обычно 180—250°C), недолго выдерживают в них и затем окончательно охлаждают на воздухе до комнатной температуры, когда и происходит закалка, т. е. превращение аустенита в мартенсит. При выдержке изделия в закалочной среде выравнивается температура по сечению изделия. Охлаждение в две ступени уменьшает внутренние напряжения и поэтому уменьшает закалочную деформацию.

При ступенчатой закалке в стали остается больше аустенита, чем при непрерывной закалке, так как мартенситное превращение, протекающее при охлаждении на воздухе, менее полное, чем при непрерывной закалке. В результате уменьшаются объемные изменения из-за большого содержания остаточного аустенита, коробление вследствие почти одновременного мартенситного превращения по всему изделию, возможность образования трещин.

Отпуск стали. Состояние закаленной стали является неравновесным (неустойчивым), в ней даже без нагрева происходят превращения и она может приближаться к равновесному состоянию. При нагревании стали увеличивается подвижность атомов и благодаря этому состояние закаленной стали все больше приближается к равновесному.

Отпуском называют температурную обработку, состоящую из нагревания закаленной стали ниже температуры равновесного фазового превращения (ниже A_{c1}), выдержки при этой температуре и охлаждения на воздухе или в воде с целью получения более устойчивого состояния структуры стали.

При отпуске закаленной стали при температуре выше 400°C образуется смесь феррита и цементита. При отпуске в пределах 350—500°C отпущенная сталь имеет структуру так называемого тро-остита, а при 500—600°C — сорбита, обладающих разной степенью дисперсности частиц цементита и разной твердостью.

Троостит представляет собой тонкодисперсную смесь феррита и цементита, а сорбит — менее дисперсную (среднедисперсную) смесь феррита и цементита (для сравнения укажем, что перлит — грубодисперсная смесь феррита и цементита). С повышением степени дисперсности структуры повышаются твердость и прочность, которые у троостита больше, чем у сорбита.

Сорбит имеет более высокую пластичность (δ , ψ), чем троостит.

Различают низко-, средне- и высокотемпературный отпуск.

При низкотемпературном (низком) отпуске закаленную сталь нагревают до температуры 250°C. Мартенсит закалки превращается в отпущенный мартенсит, при этом уменьшаются закалочные микронапряжения, повышаются прочность и немного вязкость, а также незначительно понижается твердость. Такому отпуску подвергают измерительный и режущий инструмент и изделия после их поверхностной закалки или химико-термической обработки.

При среднетемпературном (среднем) отпуске сталь нагревают до температуры 350—500°C, в результате чего она приобретает структуру троостита отпуска или троостомартенсита. После такого отпуска сталь имеет высокие релаксационную стойкость, предел упругости и выносливость. Этот отпуск применяют для изготовления рессор, пружин, штампов и др.

При высокотемпературном (высоком) отпуске сталь нагревают до температуры 500—680°C, в результате чего она приобретает структуру сорбита отпуска и имеет наилучшее соотношение прочности и вязкости. При отпуске при температуре 550—600°C почти полностью снимаются закалочные остаточные напряжения.

По сравнению с отжигом или нормализацией закалка стали с высоким отпуском значительно повышает предел прочности, предел текучести, относительное сужение и особенно повышает ударную вязкость.

19.8. СОРТАМЕНТ СТАЛЬНОГО ПРОКАТА

Прокатом называют детали и изделия, изготовленные способом прокатки. Сортаментом называют совокупность профилей (форм поперечного сечения изделий) и размеров изделий. Прокатка металла происходит при прохождении его между двумя валками прокатного стана, вращающимися в противоположные стороны, при этом металл под давлением валков обжимается, вследствие чего уменьшается толщина полосы и увеличиваются ее ширина и длина. Путем прокатки изготавливают листы, квадратный и круглый профили, швеллеры, рельсы, балки и др.

Основную массу прокатных стальных изделий прокатывают в горячем состоянии при температуре 900—1250°C (горячая прокатка) и небольшую часть — в холодном состоянии (холодная прокатка).

Прокатка — один из самых распространенных способов обработки металлов давлением. Им обрабатывается около 75% всей выплавляемой стали. Стальной прокат широко применяется в строительстве зданий, сооружений, мостов, на железнодорожном транспорте, в других отраслях производства.

Стальной прокат разделяют на четыре основные группы: листовая сталь, сортовая сталь, специальные виды стали и трубы.

Листовую сталь разделяют на два основных вида: тонколистовую — листы толщиной меньше 4 мм и толстолистовую — листы толщиной больше 4 мм. Эта сталь имеет разнообразное применение.

Сортовую сталь (рис. 19.9) разделяют на два вида: первый — профили общего назначения: лента, полосовая, квадратная и угловая сталь, проволока (различного профиля), швеллеры, двутавровые балки и др.; второй — профили специального назначения: шпунты, рельсы и др. Среди всей прокатной продукции наибольшую часть составляет сортовая сталь (около 50%).

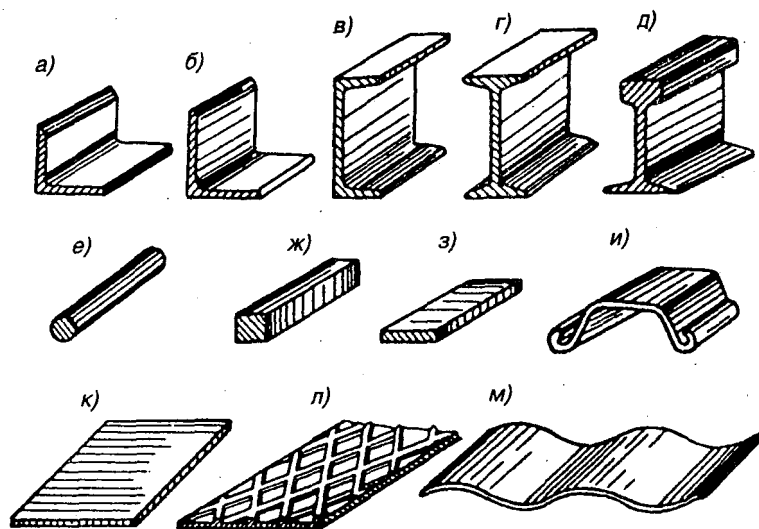


Рис. 19.9. Сортамент прокатных сталей:

а — равнобокий уголок; *б* — неравнобокий уголок; *в* — швеллер; *г* — двутавр; *д* — подкрановый рельс; *е* — круглая; *ж* — квадратная; *з* — полосовая; *и* — шпунтовая свая; *к* — листовая; *л* — рифленая; *м* — волнистая

К специальным видам проката относятся периодические профили (попеременное поперечное сечение по длине проката), гнутые профили, цельнокатанные колеса, бандаж и др. К периодическим профилям проката относится, в частности, применяемая в железобетоне арматурная сталь. Гнутые профили изготавливают из ленты или листа толщиной 0,2—20 мм; они весьма широко применяются в строительстве — в оконных переплетах, в строительных конструкциях и др.

Стальные трубы. Выпускаются бесшовные и сварные стальные трубы, причем наиболее быстро увеличивается производство сварных труб.

19.9. АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Из группы цветных металлов наибольшее распространение получили алюминий и его сплавы. Как и железо, он является металлом, добываемым из недр земли в виде соответствующих руд, поступающих на переработку. Алюминий — серебристо-белый металл с температурой плавления $660,4^{\circ}\text{C}$, плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$, пределом прочности 127 МПа, твердостью 245 МПа. По распространенности в земной коре он занимает первое место среди металлов и третье (после кислорода и кремния) среди всех элементов, а именно — содержание алюминия в земной коре составляет 8,45% мас., тогда как содержание железа 4,85% мас. Он химически весьма активен и поэтому всегда в природе находится только в виде соединений. Свыше 200 минералов в земной коре содержат в своем составе алюминий. Почти половина из них — алюмосиликаты, в особенности полевые шпаты, на долю которых приходится более половины массы земной коры, а также нефелин, цеолиты, слюды и другие минералы. Кроме того, алюмосиликаты содержатся во вторичных породах, образовавшихся вследствие выветривания первичных с переходом их в каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, боксит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Одной из важных алюминиевых руд является алунит. Важнейшие соединения алюминиевых руд: криолит Na_3AlF_6 , боксит и латерит.

Получают алюминий из чистого оксида алюминия, выделяемого из обезвоженных прокаливанием бокситов и других руд. Для этого оксид алюминия (иногда называемый глиноземом) подвергают электролизу в расплавленном состоянии и при высокой температуре (около 1000°C) и большой силе тока. Для понижения температуры плавления добавляют минерал криолит и получают криолитоглино-земный расплав. В результате: $2\text{Al}_2\text{O}_3 = 4\text{Al}$ (на катоде) + 3O_2 (на аноде). Электролиз выполняют в ванне (рис. 19.10), катодом служит ее графитовая подина. Собранный на катоде (на дне ванны) алюминий периодически выпускают из ванны. В целом производство алюминия является трудоемким и сложным.

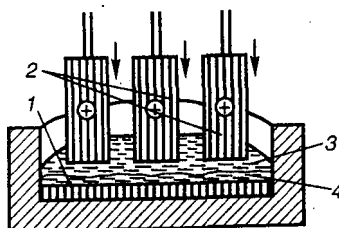


Рис. 19.10. Схема электролитической ванны для получения алюминия:

1 — графитовая подина-катод; 2 — графитовые аноды; 3 — расплав электролита; 4 — расплавленный алюминий

Для повышения механической прочности в алюминий вводят легирующие добавки — Mg, Mn, Cu, Si, Zn, т. е. переводят чистый алюминий в сплавы. В качестве конструкционных материалов чаще используют именно сплавы. Их разделяют на деформируемые, характеризующиеся своей высокой пластичностью и прочностью, и литейные — для изготовления из них различных отливок. Среди деформируемых сплавов — дюралюмины, содержащие добавки меди, магния, марганца, кремния, железа. К литейным относят сплавы, содержащие до 7% кремния и именуемые силуминами или до 10% магния и отличающиеся высокой коррозионной стойкостью. Марки технического алюминия: АД, АД1; марки высокопрочного: В-95, В-96.

Алюминиевые сплавы применяют в различных отраслях промышленности, а также в промышленном и гражданском строительстве, в том числе при возведении подъемно-транспортных сооружений, мостов, сборных домов, труб, профилей любого сечения, для изготовления оконных и дверных алюминиевых блоков, фасадов зданий, витражей, защитных рольставень, карнизов и т. д.

19.10. КОРРОЗИЯ ЖЕЛЕЗА И ДРУГИХ МЕТАЛЛОВ

Выше была изложена сущность процессов коррозии бетонов и других ИСК на основе неорганических вяжущих веществ. Теперь следует рассмотреть коррозию металлов, причиняющую огромный урон конструкциям, оборудованию, трубопроводам и другим металлическим объектам.

Процесс коррозии очень сложен и продолжает оставаться не вполне выясненным и гипотетическим. Между тем различают несколько видов коррозии металлов, и весьма распространенной среди них является электрохимическая с возможным разделением ее на химическую и электрическую.

Химическая коррозия заключается в потере атомами металла электронов и переходе атомов в ионы. Из свободного состояния металл в своих поверхностных слоях переходит в химически связанное. Так, например, электроны атома железа переходят к ионам водорода, которых хотя и мало в воде, но все же всегда присутствуют: $\text{Fe} + 2\text{H} + 2\text{OH} = \text{H}_2 + \text{Fe}(\text{OH})_2$ с образованием гидрата закиси железа. Под воздействием кислорода воздуха или растворенного в воде происходит дальнейшая потеря железом электронов с переходом гидрата закисного железа в гидрооксид $\text{Fe}(\text{OH})_3$, что адекватно образованию ржавчины. Налет ржавчины на железе образует рыхлый слой, и поэтому процесс порчи железа постепенно распространяется на всю толщину металла, полностью разрушает элемент, подвергшийся коррозии.

В том же направлении происходят реакции и с другими металлами. Однако в других металлах (алюминии, цинке, олове и др.) образующаяся оксидная пленка имеет значительно меньшую толщину и, главное, обладает повышенной плотностью (а не рыхлым слоем, как у железа), что защищает металл от дальнейшей коррозии. Именно поэтому одним из видов предохранения железа от коррозии служит покрытие его слоем цинка (оцинкованное железо), или слоем олова (белая жечь), или слоем никеля (никелирование). Среди других средств предохранения железа против химической реакции используют способ периодической покраски покрытий масляной краской и другими антикоррозионными веществами.

Следует отметить, что чистое железо корродирует меньше, чем при включении в него примесей, хотя используют специально вводимые «примеси» (добавки), которые предохраняют сталь от коррозии (нержавеющая сталь).

Наряду с окислительными процессами, характеризующимися отдачей электронов, возможна также чисто электрическая коррозия. В этом случае перенос электронов происходит в результате образования гальванических микроэлементов. Под влиянием различных факторов — структурной и химической неоднородности поверхности металла, неравномерности распределения деформаций в металле после термической и механической обработки и др. — корродирующий металл становится как бы многоэлектродным гальваническим элементом. Электрическая коррозия протекает под действием блуждающих токов, что особенно характерно для рельсового пути электрических железных дорог.

Электрохимическая коррозия протекает при совмещениях корродирующего железа с другим металлом, например с медью, в растворе электролита.

Заключительная

В заключительной главе обобщены наиболее принципиальные и значимые положения строительного материаловедения, которые пока почти отсутствуют в учебной литературе, но призваны влиять на уровень мировоззрения специалистов (или будущих специалистов) в этой отрасли. Следует отметить, что все выделяемые в резюме положения публиковались автором и ранее в периодической печати и разного рода научных сборниках.

Современное строительное материаловедение как фундаментальная наука прикладного характера состоит из двух частей — практической и теоретической. Практика в этой науке, подобно большинству наук, всегда имела приоритетное значение и под общим названием «Строительные материалы» или «Строительные материалы и изделия» она многократно на высоком научном уровне [50] излагалась, в основном, в учебниках и учебных пособиях. Теория, призванная систематизировать и обобщать практические данные в объективных закономерностях, в своем историческом развитии непреклонно следовала за практикой, иногда временно опережая ее, но, тем не менее, непрерывно находясь с ней в теснейшей взаимосвязи. Как показано в этом учебном пособии, теснейшая взаимосвязь практики и теории служит спонтанным фактором саморазвития науки и формирования мировоззрения о строительном материаловедении как фундаментальной науке прикладного характера.

Становление строительного материаловедения относится к древнейшему периоду и связано с началом использования обжига глины и глинистых изделий с целью придания им твердого и водостойкого состояния. Исторический путь этой фундаментальной науки насчитывает три этапа, весьма неравных по своей продолжительности. Они описаны в первой главе книги, но ввиду принципиальной значимости, как всякой истории, изложены еще и в отдельной брошюре [12]. Исторический процесс составляет важнейший элемент изучения этой фундаментальной науки.

Многочисленные природные и искусственные строительные материалы в этой науке объединены с помощью единой классификации. В ней каждый материал и все вместе проходят постадийное во времени формирование. Кроме традиционных, в нее внесены пока отсутствующие в номенклатуре. Открытие новых или модифицированных материалов с разработкой соответствующих технологий сопровождается заполнением в классификации свободных мест (клеток), что является закономерным процессом с исключением из него элементов случайного изобретательства. Вследствие такого закономерного процесса классификация имеет динамичный характер. Каждый новый, вносимый в нее материал остается не только сходным с предыдущими в ней, но при оптимальной структуре и подобным им. Наиболее ярко выраженной разновидностью материалов представлены искусственные строительные конгломераты (ИСК). Им посвящена в строительном материаловедении специальная теория из четырех взаимно связанных частей, достаточно подробно изложенных ранее [39] и в настоящей книге.

Важнейшим положением является оптимизация структур в строительном материаловедении, многократно использованная и полностью апробированная в практике (на производстве). Она обеспечена общим научно обоснованным методом проектирования и корректирования составов ИСК с использованием в нем экспериментально-математических и компьютерных программ (например, типа Excel, а ранее — программ на языках Бейсик или Фортран). Об этом подробно изложено в настоящем учебном пособии и в ранее изданных [42, 45].

В строительном материаловедении сформулирована и доказана теорема о подобии материалов оптимальной структуры: геометрическом, физическом и технологическом. Предложен индикатор подобия И.А. Рыбьева, который при его значении, равном единице,

констатирует наличие у материалов оптимальной структуры и, как следствие, их подобие между собой [19, 30, 41].

Предложена общая теория отвердевания матричного вещества в ИСК, ранее опубликованная в [19, 38]. На фоне большого скопления специфических, частных теорий твердения различных — неорганических и органических — вяжущих веществ общая теория отвердевания в строительном материаловедении весьма уместна и целесообразна. Она с термодинамических позиций ориентирует практику на технологические процессы, фиксирующие минимумы энтропии и комплекс наилучших качественных показателей при оптимальных структурах и, следовательно, являющихся экстремальными. Важно, чтобы показатели качества готовых изделий находились не только на уровне заданных (проектных), но и чтобы последние становились экстремумами, обеспечивая действие закона створа.

Изложено первое в истории отечественного материаловедения научное открытие — закон створа, — подтвержденное дипломом Международной ассоциации авторов научных открытий: «Закономерность соответствия физических свойств и структуры твердого и твердообразного (упруговязкопластичного) материала» (регистрационный № АНО-2/58 от 01.11.98). Суть его заключается в том, что «комплекс экстремальных значений главных физических свойств твердого и твердообразного (упруговязкопластичного) материала соответствует их оптимальной структуре, характеризующейся равномерным расположением дискретных частиц и непрерывностью пространственной сетки связующего при минимальных толщинах его распределения...» [26, 33]. Изложена также сущность двух других общих законов, открытых автором, — закон конгруэнции и закон прочности оптимальных структур. Как и закон створа, они внесли существенное углубление объективных знаний в этой науке, способствовали обеспечению эффективных решений технологических задач в практике [27, 34].

С учетом общих и объективных законов, упомянутых выше, выведены общая (3.3) и еще более полная — обобщенная (3.10) формулы прочности ИСК оптимальной структуры, все члены в которых имеют строгий физический смысл [19]. Общая формула увязана с формулой прочности Гриффитса и выражена в виде зависимости (3.7). В ней упрочняющие факторы (в числителе) и разупрочняющие (в знаменателе) ориентируют на конкретные практические мероприятия, благоприятствующие достижению высшего качества готовой продукции как первого критерия прогрессивных технологий (см. 6.3.1). Примечательно, что в общей формуле прочности для любых видов напряжений впервые содержатся практически все структурные элементы и отражено влияние главных технологических параметров, влияющих в той или иной мере на числовые значения прочности — количество и качество вяжущего вещества, его расчетная прочностная характеристика, количество и качество заполняющей части в ИСК, пористость, интенсивность уплотнения, температура, скорость деформирования и др. Формулы лежат в основе программ, используемых при проектировании оптимальных составов ИСК и оптимальной структуры [28, 42, 45]. Побочным следствием из общей формулы прочности и закона конгруэнции является взаимосвязь между активностью вяжущего матричного вещества и его количеством в ИСК оптимальной структуры (3.13).

Раскрыта сущность и разработана комплексная смысловая и количественная критериальная характеристика прогрессивных технологий в строительном материаловедении с учетом уровня мировых достижений в данной конкретной отрасли [35, 36]. Отмечено, что принятая в настоящее время оценка прогрессивности и эффективности производства, научных разработок, проектных решений и т. п. по одному-двум показателям (обычно по качеству или по себестоимости продукции) являются безусловно недостаточными, поскольку при их удовлетворительном уровне все остальные могут оказаться неудовлетворительными или пониженными по сравнению с существующими достижениями в данной отрасли производства.

Разработаны типичные оптимизирующие факторы, используемые для совершенствования технологий до уровня прогрессивных по всему комплексу критериальных значений. Являясь в системе типичными, факторы пригодны для практических технологий различной направленности [32], но в каждой из них они принимают ярко выраженное конкретное содержание реализуемых мероприятий.

Показаны три временных элемента, слагающих долговечность ИСК оптимальной структуры. Решаемая задача заключается во всемерном увеличении каждого временного элемента, причем особое внимание уделяется комплексу оперативных мероприятий по торможению деструкции ИСК в конструкциях за счет, например, ингибирующих добавок, вводимых в технологический период, или своевременных обработок, применяемых в эксплуатационный период [19, 36, 37].

В Российской архитектурно-строительной энциклопедии отмечено: теория ИСК «служит важнейшим теоретическим компонентом» [23]. В частности, по своему содержанию и построению она составляет эффективную методологическую основу научно-технических исследований новых и модифицированных строительных материалов с применением в них различных сырьевых веществ и технологий. Первая часть этой теории, именуемая теоретической технологией, исходит из закономерностей, на которые опираются переделы производства. Во второй части сосредоточены законы оптимальных структур, в третьей — проблемы долговечности и надежности готовой продукции. Четвертая часть устанавливает научную достоверность исследований и полученных результатов при тщательном техническом контроле на производстве. Как методологическая основа, теория ИСК была многократно использована при разработке эффективных материалов и изделий на неорганических и органических, в том числе полимерных, вяжущих веществах по безобжиговой и обжиговой технологиям [37]. Среди наиболее значимых — легкие бетоны с применением в них вакулита, шарообразного керамзита; арболиты обычные и прессованные на основе портландцемента и высокопрочного гипса и с применением обогащенного древесного заполнителя; изоляционно-отделочные древесно-минеральные плиты повышенной прочности; керамзито-золобетон поризованный на основе нового цементно-золяного вяжущего вещества; цементный бетон прессованный для тоннелестроения; расширение сырьевой базы из гипсового камня пониженного качества, включая его третий сорт, для производства высокопрочного гипса альфа-модификации; новые абразивные круги для механической обработки (шлифования) прочных горных пород (типа гранитов) на основе магнезиально-перлитовых и шлакощелочных вяжущих веществ; рулонный кровельный эластостеклобит наплавленного типа; полиуретановый герметик; дренарующий асфальтовый бетон для быстропротвердевающих дорожных покрытий, архитектурно-выразительные отделочные крупногабаритные керамические плиты типа «Чак-Чак» и многие другие. В основе обеспечения их качества лежит принцип оптимизации структуры, достигаемой с помощью общего и единого методов проектирования их составов.

Изложена сущность синергообработки на примере синергобетонирования. Проф. А.С. Арбенев разработал специальное оборудование, которое позволило одновременно использовать при совмещении компонентов бетонной смеси несколько видов энергии. Последующее постепенное остывание отформованного изделия благоприятствует протеканию процессов структурообразования с минимумом технологической пористости и повышенным качеством готовой продукции.

Синергообработка получила несколько иное направление, но также с положительным эффектом, в работах других авторов (К.В. Чаус, Л.Н. Попов) — см. Рыбьев И.А. Основы строительного материаловедения — в лекционном изложении. Изд. АСТ, 2004.

Подробнее, чем обычно, изложено в этой книге о пресной воде, как природном минерале и важнейшем компоненте в матрицах ИСК, а также о способах ее активирования и всемерной экономии. Детально рассмотрены в ней нестандартные способы оценки ак-

тивности цемента и других неорганических вяжущих веществ в характерных формулах прочности и деформируемости.

Использована общая теория отвердевания при изложении технологии изготовления строительных конструкций из различных бетонов.

Определены новые формулы прочности цементных бетонов, полностью отражающие факторы их внутреннего строения, качества компонентов и их взаимосвязи и разработаны типовые критерии прогрессивных технологий.

Изложены сведения о современных разновидностях сухих растворных смесей.

Впервые приведен метод оценки удобообрабатываемости асфальтобетонных смесей вместо используемой в настоящее время визуальной оценки.

Развита теория и производственная технология арболитов, описаны способы их вибропрессования.

Процесс дальнейшего расширения и модернизации строительного материаловедения, как фундаментальной науки прикладного характера, продолжается с соответствующим совершенствованием мировоззренческих основ современной строительной индустрии.