

УДК 621.923:621.90.17

**Н.И. Покинтелица, доцент, канд. техн. наук**

*Севастопольский национальный технический университет  
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053  
tm@sevntu.com.ua*

**В.А. Плахотник, канд. техн. наук**

*Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля  
кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, Украина, 91034  
stanki@snu.edu.ua*

## **ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ТЕРМОФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ**

*Представлены результаты исследований температурно-деформационных закономерностей процесса пластического деформирования в зоне термофрикционного резания, определяющих формирование различных видов контактного взаимодействия и влияние параметров режима резания на основные характеристики процесса.*

*Ключевые слова: режущий диск, теплота, трение, пластическое деформирование, резание, температура, обработка, инструмент, скорость резания, стружка, поверхность.*

При термофрикционной обработке (ТФО) заготовок режущими дисками (РД), наряду с традиционными источниками тепла на площадках контакта, функционирует концентрированный источник теплоты значительной интенсивности, охватывающий практически всю зону стружкообразования и создающий высокий градиент температур по глубине срезаемого слоя. При этом, как показывают расчеты и эксперименты [4], доля теплоты деформации и трения на контактных площадках в общем тепловом балансе незначительна и составляет 5...15%.

Дополнительный нагрев зоны резания обеспечивает: снижение прочности обрабатываемого материала; возникновение структурных превращений и термических напряжений в поверхностных слоях заготовки; изменение параметров трения на контактных площадках.

Исследованию обрабатываемости сталей в различном структурном состоянии посвящено много работ, в которых даются различные объяснения влияния микроструктуры на характеристики процесса резания, поэтому в настоящее время вопрос о физическом механизме этих явлений нельзя считать однозначно решенным.

Успешная обработка материалов термофрикционным резанием достигается повышением пластических свойств исключительно за счет высокотемпературного фрикционного нагрева срезаемого слоя. Поэтому научный и практический интерес представляет закономерность изменения сопротивления пластическому деформированию материала в зоне стружкообразования, которая находится в тесной взаимосвязи с изменением температуры в этой зоне и, в конечном счете, определяет оптимальные режимы обработки и качество получаемой поверхности [1–3].

При относительном движении поверхностей двух тел (диска и заготовки) с одновременным приложением давления вдоль их оси, в зоне стыка под действием сил трения интенсивно выделяется теплота, что приводит к повышению температуры поверхности трения. Под действием температуры и приложенного давления поверхности трения деформируются и материал в зоне трения переходит в пластическое состояние, что делает возможным его удаление со всей обрабатываемой поверхности. Глубина зоны, подвергнутой пластическим деформациям, зависит, в основном, от величины удельного давления, скорости относительного движения, продолжительности процесса трения и физико-механических свойств трущихся тел. Таким образом, при резании металла дисками основную теплообразующую функцию выполняет процесс трения. При изменении режимов резания изменяются условия трения между инструментом, стружкой и заготовкой вследствие изменения скорости скольжения и температуры трущихся поверхностей, что приводит к изменению механических свойств металла срезаемого слоя.

Теплота в зоне трения выделяется неравномерно. По мере ведения процесса резания температура в зоне трения выравнивается за счет теплопроводности [1]. Относительно низкая теплопроводность жаропрочных и нержавеющей сталей способствует применению термофрикционной обработки, так как при этом повышается локализация температуры в зоне резания, увеличивается степень размягчения и разупрочнения металла срезаемого слоя.

Распределение теплоты между стружкой, инструментом и заготовкой зависит от частоты вращения металлического диска и скорости подачи заготовки, материалов диска и обрабатываемой заготовки. Для рационального использования теплоты необходимо обеспечить её управление в процессе резания, так как она может пойти исключительно на резкое местное повышение температуры

деформируемого металла или поверхности режущего инструмента. В задачу управления теплотой в процессе резания входит не только регулирование общего количества получаемой теплоты, которая пропорциональна затрачиваемой механической работе, но также равномерное, по возможности, распределение источников теплоты по всему объему деформируемого при резании металла. Необходимо создать условия, при которых объем пластически деформируемого металла становился бы минимальным на единицу длины режущего лезвия.

Как показали опыты и предварительные теоретические расчеты, поскольку образовавшаяся теплота пропорциональна совершаемой работе, количество теплоты зависит от рода и механических свойств материала обрабатываемой заготовки, геометрических параметров инструмента и режима резания. На процентное распределение теплоты между стружкой, заготовкой и инструментом главное влияние оказывают механические и теплофизические свойства материала заготовки и скорость резания.

Известно, что при снятии стружки полную зону контакта на передней поверхности инструмента можно разделить на зоны пластического и упругого контакта. На участках пластического контакта наблюдается установление молекулярных связей обрабатываемого и инструментального материалов. Следы внешних перемещений на поверхности инструмента отсутствуют. Об этом свидетельствуют визуальные наблюдения, указывающие на наличие объемных вырывов инструментального материала или приконтактного слоя стружки без разрушения связи на границе РД – стружка, существование диффузии по всей площади пластического контакта.

При ТФО на переднюю поверхность РД поступают слои металла, деформированные в зоне сдвига, основная плоскость которого проходит через режущую кромку под некоторым углом к передней поверхности. В связи с тем, что на пластическом контакте нормальные напряжения велики и взаимодействуют достаточно чистые металлические поверхности, касательные напряжения оказываются достаточными для пластических деформаций и внешнее трение заменяется внутренним с образованием жидкой фазы прослойки в зоне контакта кольцевого режущего лезвия РД с материалом заготовки.

В работах [2] установлено, что наиболее важным источником тепла, повышающим температуру инструмента, является контактная зона пластического течения металла на передней поверхности инструмента. По данным Н.В.Талантова повышение температуры определяется величиной совершаемой работы и объемом металла, проходящего через зону пластического течения. Поскольку толщина этой зоны по отношению к совершаемой работе сравнительно мала, ее температура обычно значительно превышает температуру стружки. Последнее предопределяет потери тепла за счет теплопроводности и уменьшение температуры вследствие отвода теплоты в стружку. При этом повышение температуры стружки вследствие тепла, передаваемого из контактной зоны пластического течения, незначительно из-за сравнительно большого объема стружки, образующейся при ТФО. Другим фактором, обуславливающим снижение температуры в зоне контакта стружки, является передача теплоты в инструмент. В рассматриваемом случае этот фактор является решающим, а условия передачи теплоты из зоны пластического течения в инструмент значительно отличаются от соответствующих условий, возникающих при традиционном резании. Так, в процессе работы обычного инструмента на поверхности раздела зоны пластического течения со стружкой теплота распространяется непрерывно в один и тот же небольшой объем материала инструмента, где устанавливается устойчивый температурный градиент. Количество теплоты, переходящей при традиционном резании из зоны пластического течения в инструмент сравнительно невелико. В процессе термофрикционного резания вращение РД с высокой скоростью приводит к непрерывной смене его рабочих участков, причем в зону контакта попадают новые объемы его материала, охлаждаемые за время холостого пробег. В связи с большим градиентом температур теплоотвод в инструмент резко увеличивается. Однако, с другой стороны, каждый объем материала инструмента находится в зоне контакта лишь малый промежуток времени ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$  с) и не успевает нагреться до стабильной температуры режима установившегося теплообмена, характерного для традиционного резания. Аналогичная картина имеет место и в отношении источника тепла, действующего в зоне контакта на задней поверхности инструмента.

Таким образом, тепловые процессы на контактных поверхностях РД происходят в условиях неустановившегося теплообмена. Эти условия практически адекватны условиям переходного процесса теплообмена, которые создаются в первоначальный период работы неподвижного инструмента, при традиционном резании. Действительно, как в первом, так и во втором случаях при сопоставимых режимах резания в зоне контакта находятся ранее не нагретые (или охлажденные до сравнительно низкой температуры за период холостого пробег) и покрытые химическими и адсорбционными пленками рабочие участки лезвия РД. При этом температура рабочих поверхностей зависит от времени контакта точек лезвия с обрабатываемым материалом и определяется законом протекания переходного процесса по времени. Как показывают результаты исследований, температура резания монотонно растет во времени, достигая вполне определенной величины при установившемся теплообмене. Каждой скорости резания соответствует определенный фронт нарастания температуры, причем с повышением скорости длительность переходного процесса выравнивания температуры сокращается. С уменьшением

скорости резания, в связи с увеличением времени протекания процессов пластического деформирования, возрастает интенсивность стока тепла из мест его выделения (из зоны контактного взаимодействия и зоны стружкообразования). Снижается интенсивность роста температуры по ходу пластического деформирования. Причем с уменьшением скорости резания более интенсивно уменьшается рост температур в зоне стружкообразования, чем в зоне контактного взаимодействия. В результате этого в процессе пластического деформирования в зоне стружкообразования эффект температурного разупрочнения снижается.

С увеличением толщины среза фронт нарастания температуры также возрастает, а изменение ширины срезаемого слоя практически не влияет на интенсивность протекания процесса.

С целью установления оптимального температурного режима исследуемые материалы подвергались растяжению и разрыву в нагретом состоянии при температурах от 20°C до 1200°C, с интервалом 200°C, при средней скорости деформации  $V = 0,007 \text{ с}^{-1}$ . Испытывались круглые образцы стандартных размеров с начальной расчетной длиной  $\ell_0 = 5F_0$ . Образцы изготавливались из углеродистой качественной конструкционной стали 45, хромомарганцевоникелевой стали 38ХГН и жаропрочного сплава ЭИ904 (09Х15Н8Ю). Материалы выбирались для исследования с учетом запросов ряда предприятий.

Нагрев проводился в герметичной температурной камере, установленной в зоне растяжения разрывной полуавтоматической установки РПУ-1, что дало возможность равномерно нагревать весь объем испытуемых образцов и сохранять постоянство температуры с точностью до 5°C в процессе всего цикла растяжения.

После нагрева образцы выдерживались при заданной температуре в течение 10 мин, а затем разрывались при постоянной скорости движения захватов. Нагрев и последующий разрыв производился для каждой температурной точки на трех образцах. Результаты испытаний представлены в виде графиков на рисунке 1. На первый взгляд, полученные кривые, кроме общей тенденции к снижению  $\sigma_\theta(\theta)$  в зависимости от температуры, не подчиняется единой закономерности. Однако такую закономерность можно установить, упорядочив экспериментальные данные, рассмотрев их с позиции теории подобия, если откладывать по оси ординат относительное временное сопротивление  $S = \sigma_\theta(\theta) / \sigma_\theta$  [4]. Как видно из нижней части рисунка 1, в системе координат  $S - \theta$  экспериментальные данные испытываемых сталей группируются вокруг обобщенной зависимости:

$$S = \exp[-m_1 \theta^z] \tag{1}$$

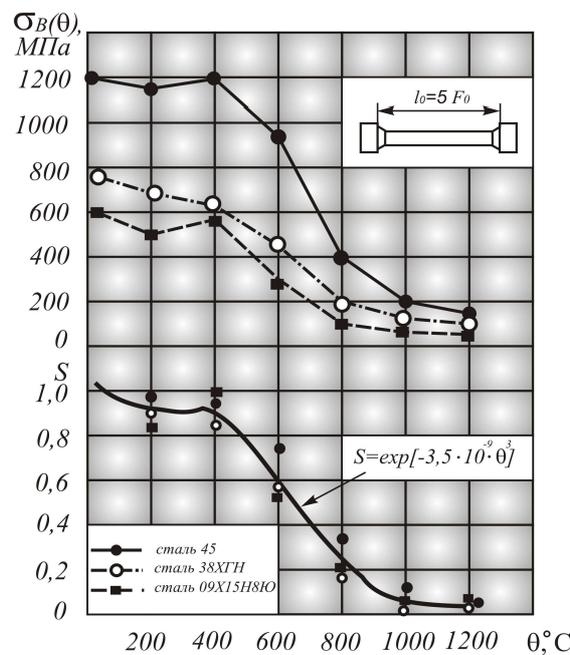


Рисунок 1 – Конкретные и обобщенная зависимости временного сопротивления  $\sigma_\theta$  испытываемых материалов от температуры  $\theta$

Приведенная зависимость относится к результатам механических испытаний, при которых скорость деформирования  $\dot{\epsilon}$  на несколько порядков ниже, чем при резании. Использование зависимости (1) для ряда практических расчетов при термофрикционной обработке возможно с учетом влияния  $\dot{\epsilon}$ , возникающих при резании путем модификации температур по скорости деформирования. Для этого в формулу (1) вместо температуры  $\theta$  необходимо подставить значение  $\alpha\theta$ , где коэффициент  $\alpha < 1$  зависит от скорости деформирования. Расчеты для некоторых средних значений  $\dot{\epsilon}$ , относящиеся к процессу резания, показывают, что  $\alpha \cong 0,8 \dots 0,85$  и  $z \cong 3$ .

Таким образом, выражение (1) показывает, что несмотря на различие конкретных значений прочности для испытываемых материалов, процесс разрушения их при повышенных температурах обладает признаками подобия и позволяет установить единый предел оптимальной рабочей температуры обработки  $1000 \dots 1100^\circ\text{C}$ , обеспечивающий минимальное сопротивление деформированию.

Физическая природа зарождения, развития и существования процесса контактного пластического деформирования по передней грани и площадке износа задней грани инструмента заключается: в формировании отрицательного градиента упрочненного состояния контактных объемов в результате процессов, протекающих в объемах металла, прилегающих к радиусу округления режущей кромки (сжатие и упрочнение элементарных объемов металла, перемещающихся по поверхности раздела по направлению к радиусу округления); в существовании между обрабатываемым и инструментальным материалами в пределах пластического контакта устойчивой адгезионной связи на атомном уровне по всей действительной поверхности инструмента.

Весьма интенсивный локальный нагрев поверхностных слоев обрабатываемого материала вызывает в них температурное поле высокой степени неравномерности, что создает в металле резко неравномерное поле напряжений, которое может привести к микроразрывам и другим дефектам сплошности в поверхностном слое заготовки и, с одной стороны, содействовать облегчению процесса стружкообразования, а с другой, привести к необратимым фазовым превращениям.

Исследованиями установлено [2, 3], что при температуре нагрева контактной зоны до  $1100^\circ\text{C}$  фазовые изменения и дефекты сплошности в поверхностном слое незначительны и легко устраняются чистой обработкой.

Наконец, повышение температуры при фрикционном нагреве в местах контакта влияет на трение режущей поверхности инструмента с обрабатываемым материалом. По данным Резникова А.Н. [4] с увеличением температуры контакта коэффициент трения при резании вначале возрастает, а затем снижается, причем максимум приходится на температуры порядка  $400 \dots 600^\circ\text{C}$ .

При термофрикционной обработке температура не контактных поверхностях значительно выше  $600^\circ\text{C}$ , что предполагает значительное снижение коэффициента трения по сравнению с обычным резанием и приводит к уменьшению удельной силы трения на поверхностях инструмента. Естественным результатом этого является снижение интенсивности изнашивания и повышение стойкости режущего диска.

Описанная выше определяющая роль температурно-деформационных закономерностей процесса пластического деформирования в зоне резания в формировании различных видов контактного взаимодействия и стружкообразования и влияния параметров режима резания на основные характеристики процесса ТФО позволяет правильно предвидеть и прогнозировать влияние изменений условий резания на величины основных характеристик процесса резания. Все это позволяет управлять процессом резания.

#### **Библиографический список**

1. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения / В.А. Балакин. — М.: Машиностроение, 1980.—136 с.
2. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов. — М.: Машиностроение, 1992. — 240 с.
3. Определение длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента при термофрикционном резании / Е.У. Зарубицкий, Н.И. Покинтелица, В.А. Плахотник, Т.П. Костина // Физические процессы при резании металлов. — Волгоград: ВолгГТУ, 1994. — С. 10–12.
4. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки металлов / А.Н. Резников. — М.: Машиностроение, 1981. — 297 с.

*Поступила в редакцию 22.03.2010 г.*