

УДК 691.54

**І. Барабаш, докт. техн. наук; Н.Зубченко,  
С. Кровяков, канд. техн. наук**

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

## **ЗАСТОСУВАННЯ АКТИВОВАНОГО КОМПОЗИЦІЙНОГО В'ЯЖУЧОГО ПРИ ВИРОБНИЦТВІ БЕТОНІВ**

**Резюме.** Проаналізовано властивості бетонів на активованих композиційних в'язучих. Проведено планований експеримент, в якому варіювалася кількість композиційного цементу, частка мікрокремнезему у в'язучому, частка введенного у в'язуче меленого гранульованого шлаку і температура витримки при тепло-вологій обробці бетону. Досліджено бетони, виготовлені на активованому цементі та за традиційною технологією. Показано, що бетони на композиційному в'язучому при застосуванні мікрокремнезему мають високу міцність вже в ранні терміни твердіння. При застосуванні механоактивації в'язучого морозостійкість бетонів підвищується на 50 циклів, міцність у 3-денному віці підвищується на 4...8 МПа, а у 28-денному – на 4...6 МПа. Встановлено, що склади в'язучого зі вмістом шлаку 60% і мікрокремнезему 10% дозволяють отримувати бетони, які за міцністю й морозостійкістю не поступаються бетонам на чистоклінкерному портландцементі.

**Ключові слова:** композиційний цемент, механоактивація, мікрокремнезем, бетон, тепло-волога обробка.

**I. Barabash, N. Zubchenko, S. Kroviakov**

## **THE USE OF ACTIVATED COMPOSITE BINDER IN THE PRODUCTION OF CONCRETE**

**Summary.** The purpose of this work is to obtain energy and resource-efficient composite cements and concretes based on them using technogenic waste and mechanical activation.

The properties of concrete on the mechanically activated composite cements have been investigated. 4 factorial experiment was held in which the amount of binder (300–500 kg/m<sup>3</sup>), the proportion of microsilica in the binder (0–10%), the binder proportion of the ground granulated slag (0–60%), the temperature of isothermal holding during the heat treatment of concrete (20–80 °C) varied. All blends had the same mobility.

Concretes produced on activated cement and on the traditional technology were investigated. Activation was carried out in a high-speed Tribo mechanical activator. The duration of activation was 60 seconds.

It is shown that through the use of composite binding concrete with high strength at an early age can be obtained. Mechanical activation of the binder increases the strength of concrete in 3 days of age at 4...8 MPa, in 28 day of age at 4...6 MPa. Activation increases the strength of the concrete by reducing the amount of water and accelerate the chemical reactions. Introduction of 10% microsilica in the composite binder increases the strength of concrete at 5...8 MPa. The heat treatment increases the strength of concrete at early ages. The effective temperature of exposure is 50°C treatment. At age 28 days the thermal treatment does not affect the strength.

Energy and resource-efficient composite cements were obtained. When used with a binder content of 60% slag and 10% microsilica can be obtained the concrete, strength and frost-resistance of which are not worse than that on pure Portland cement. The amount of cement has the greatest influence on the frost resistance of concrete. While using mechanical activation binder concrete frost resistance is increased in 50 cycles.

The optimal compositions of concrete on the activated composite binders were determined. These binders significantly improve the efficiency of waste in metallurgical industry.

**Key words:** composite cement, mechanical activation, microsilica, concrete, heat-moisture treatment.

**Постановка проблеми.** Сучасна будівельна галузь вимагає максимального використання техногенної та природної сировини при виробництві в'язучих. Одним із відомих шляхів зниження енерго- і матеріаломісткості виробництва гідралічних в'язучих є використання відходів металургійних виробництв – доменних шлаків. Практика виробництва малоклінкерних цементів показала, що найефективнішим методом застосування шлаків можна вважати їх використання у складі композиційного цементу, тобто в'язучих, що містять, крім клінкеру, не менше двох основних компонентів та до складу яких входить до 80% мінеральних добавок [1,2]. В умовах сировинної бази України в якості компонентів композиційного цементу сумісно з доменним шлаком [3] найдоцільніше використовувати мікрокремнезем в якості пуцолану [4]. Також композиційний цемент добре поєднується з пластифікаторами, завдяки чому можна отримати в'язуче низької водопотреби [2]. Одним із ефективних і технічно опрацьованих методів активації є механоактивація. Даний вид активації успішно застосовувався для багатьох видів цементу [5]. Проте на сьогодні практично відсутня інформація про технологічні прийоми підвищення ефективності композиційних в'язучих за рахунок активації. Тому актуальною є завдання вивчення можливості застосування механоактивованого композиційного цементу на основі вітчизняної сировини і техногенних відходів у поєднанні з суперпластифікатором.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У композиційному цементі при заміні клінкеру різними комбінаціями природних і техногенних добавок відбувається утворення нових продуктів, за рахунок чого можливе прискорення процесів гідратації, підвищення міцності і морозостійкості композиту на основі даного в'язучого [2]. Як показано в роботах М.А. Саніцко [6], за рахунок оптимального співвідношення компонентів, що мають різну природу активності, можливе отримання композиційних цементів, які не поступаються за характеристиками міцності вихідним клінкерному цементам і при цьому мають деякі додаткові важливі характеристики. Обсяг виробництва композиційного цементу у світі на даний момент невисокий – за даними [7] він становить близько 1% від сумарного обсягу цементного виробництва, а за даними [8] – 2,5%. Проте відсоток виробництва композиційних в'язучих зростає.

Тобто композиційні цементні є високоефективними в'язучими, що дозволяють отримувати композити з високою міцністю, сульфатостійкістю і тріщиностійкістю. Також композиційні цементні добре поєднуються з пластифікуючими добавками, завдяки чому можна отримати в'язуче низької водопотреби [9].

**Метою роботи** є отримання енерго- і ресурсоефективних композиційних цементів і бетонів на їх основі за рахунок використання техногенних відходів та застосування механоактивації.

**Постановка завдання.** Основним завданням дослідження було вивчення впливу складу активованого композиційного в'язучого на фізико-механічні властивості бетону на його основі. При дослідженні властивостей бетону на композиційному в'язучому в якості компонентів використано клінкер, гіпсовий камінь, доменний гранульований шлак металургійного комбінату «Запоріжсталь» і мікрокремнезем [10]. За 25-точковим оптимальним планом проведено 4-факторний експеримент [11], в якому варіювалися такі фактори складу:

- $X_1$  – кількість в'язучого ( $400 \pm 100 \text{ кг/м}^3$ );
- $X_2$  – частка мікрокремнезема у в'язучому ( $5 \pm 5\%$ );
- $X_3$  – частка введенного у в'язуче меленого до  $S_{\text{пт}}=400 \text{ м}^2/\text{кг}$  гранульованого шлаку ( $30 \pm 30\%$ );
- $X_4$  – температура ізотермічної витримки твердіння бетону ( $50 \pm 30^\circ\text{C}$ ).

Тепло-вологу обробку бетону проведено за режимом  $2+2+6+2=12$  годин при терміні ізотермічної витримки 6 годин. Використано гранітний щебінь крупністю 5...20 мм і кар'єрний пісок з модулем крупності 2,7, а також добавку

суперпластифікатор С-3 в кількості 1% від маси цементу. Всі дослідження проводилися на двох аналогічних серіях зразків: із застосуванням механоактивації в'язучого тривалістю 60 с в трібоактиваторі [5] та виготовленою за традиційною технологією, тобто контрольної.

**Результати дослідження.** Всі бетонні суміші мали рівну рухливість ОК=6±1 см, тобто кількість води залежала від складу. Аналіз показав, що на водопотребу і В/Ц рівнорухомих бетонних сумішей на базі композиційного цементу найістотніше впливає кількість в'язучого – в міру його збільшення В/Ц знижується. Вміст мікрокремнезему і шлаку в композиційному цементі неістотно впливає на В/Ц. За рахунок активації водопотреба сумішей знижується на 5...7%.

Визначалася міцність матеріалу у 3-х і 28-ми денному віці. За результатами визначення міцності в 25-ти експериментальних точках були побудовані експериментально-статистичні (ЕС) моделі впливу факторів на міцність при стиску бетону у віці 3-х діб, відповідно для складів на активованому в'язучому (індекс «а») і контрольних (індекс «к»):

$$f_{ck.cube.3.a} \text{ (МПа)} = 28.4 + 4.1x_1 - 2.6x_1^2 + 0.8x_1x_2 - 0.4x_1x_3 + 2.6x_2 + 0.4x_2x_3 + 0.6x_2x_4 - 2.5x_3 + 8.2x_4 - 1.5x_4^2 \quad (1)$$

$$f_{ck.cube.3.k} \text{ (МПа)} = 22.4 + 3.3x_1 - 2.0x_1^2 + 0.7x_1x_2 - 0.4x_1x_3 + 0.4x_1x_4 + 2.1x_2 + 0.4x_2x_3 + 0.5x_2x_4 - 1.8x_3 + 7.3x_4 - 1.0x_4^2 \quad (2)$$

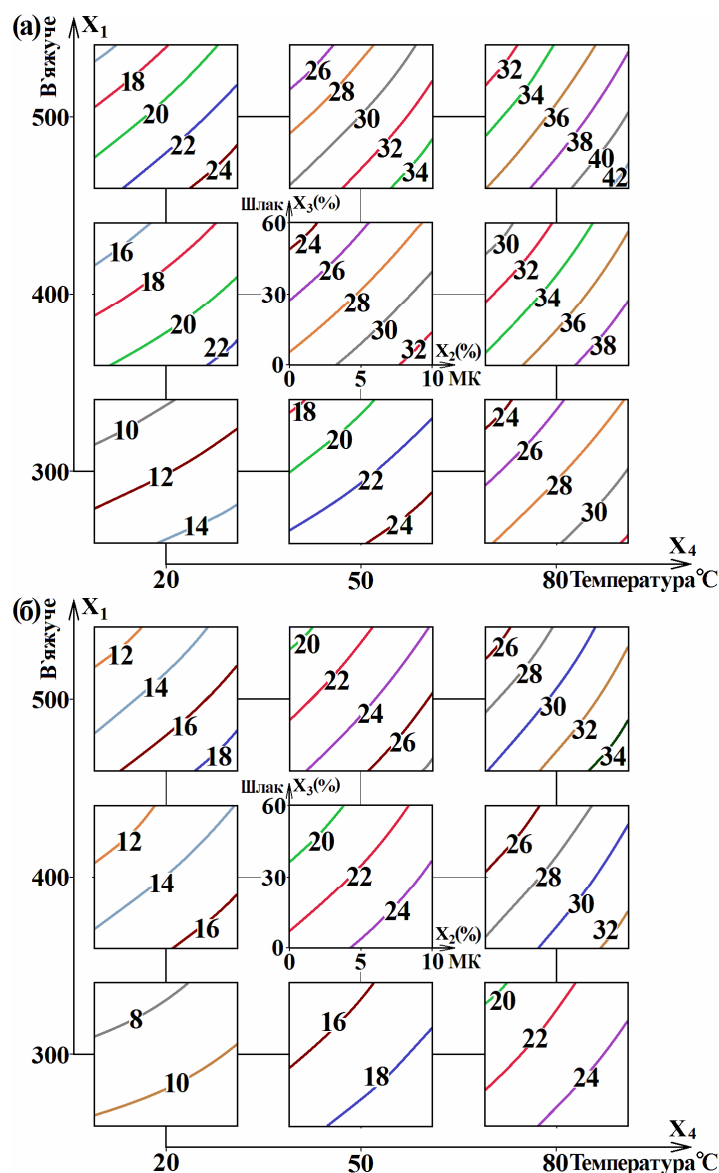
За наведеними вище ЕС-моделями були побудовані діаграми типу «квадрати на квадраті» (рис.1). В якості несучого квадрата обрані фактори – кількість в'язучого ( $x_1$ ) і температура ізотермічної витримки ( $x_4$ ). Поля, що відображають вплив частки мікрокремнезему ( $x_2$ ) і доменного шлаку ( $x_3$ ), побудовані в дев'яти точках.

Аналіз показаних на рис.1 діаграм дозволяє сказати, що збільшення кількості в'язучого в бетоні природно підвищує міцність матеріалу. При введенні в композиційне в'язучий 10% мікрокремнезему міцність бетону в 3-х добовому віці зростає на 4...6 МПа як для активованих, так і для контрольних складів. Заміна клінкерної складової у в'язкому на мелений шлак викликає зниження ранньої міцності бетону на величину до 7 МПа при введенні 60% даного техногенного відходу.

Також проведений аналіз показав, що суттєво на міцність дослідженого бетону на композиційному в'язучому у віці 3-х діб впливала температура ізотермічної витримки, тобто наявність і режим тепло-вологої обробки. Бетон, що твердів в умовах тепло-вологої обробки при температурі 50°C, показали приріст ранньої міцності на 7...10 МПа в порівнянні з бетоном нормального твердіння. Склад, що твердів при максимальній температурі мав на 13...18 МПа більшу міцність в порівнянні з бетоном, що твердів в нормальних умовах при температурі 20°C. Найважливішим технічним результатом можна вважати те, що бетон на активованому композиційному в'язучому мав міцність в 3-добовому віці на 3.8 МПа вище, ніж бетон аналогічних складів, приготований за традиційною технологією. Тобто механоактивація є ефективним методом підвищення міцності бетону, в тому числі на основі композиційних цементів, а також при спільному застосуванні активації й тепло-вологої обробки.

Аналіз впливу факторів, які варіювалися в дослідженнях, на міцність бетону у 28-денному віці показав, що режим тепло-вологої обробки не впливає на цей показник якості матеріалу. Міцність бетонів на активованому в'язучому і приготовлених за традиційною технологією збільшується в міру підвищення кількості в'язучого і вмісту

мікрокремнезему в композиційному цементі. Збільшення вмісту меленого доменного шлаку несуттєво знижує міцність бетону. Однак при кількості даного техногенного відходу до 30% міцність усіх досліджених бетонів у 28-денному віці знижувалася не більше, ніж на 4 МПа. При введенні 60% шлаку зниження міцності досягає 9 МПа. Важливо відзначити, що завдяки використанню композиційного в'язучого зниження міцності в результаті застосування доменного шлаку в якості найбільшого за кількістю компонента може бути повністю компенсовано за рахунок введення мікрокремнезему, який має пуцоланову активність. Міцність бетону на в'язучому, в якому використано до 60% техногенного відходу і 10% мікрокремнезему, була не нижче міцності бетону на чистому клінкерному в'язучому. Таким чином, композиційно в'язучий забезпечує необхідні характеристики міцності бетону як в ранні терміни твердіння, так і в марочному віці.



**Рисунок 1.** Вплив варійованих факторів складу на міцність бетону на композиційному в'язучому у віці 3-х діб: а – активоване в'язуче, б – контрольні склади

**Figure 1.** Effect of variable factors on the composition of the concrete strength on the composite binder in aged 3 days: a – activated binder, b – control concrete

Важливо відзначити, що ефективність застосування механоактивації в'язучого зберігається в 28-денному віці. Бетони на активованому композиційному в'язучому

показують на 4...6 МПа більшу міцність в порівнянні з бетонами аналогічних складів, виготовлених за традиційною технологією. Більш висока міцність бетону на механоактивованому в'язучому пояснюється меншим водовмістом сумішей, приготуваних на активованому композиційному цементі, а також підвищенням хімічного потенціалу компонентів композиційного в'язучого в результаті активації.

В рамках цієї роботи також досліджувалася морозостійкість бетону на композиційному цементі. ЕС-моделі, які описують вплив варійованих факторів складу на морозостійкість бетонів на композиційному в'язучому (для складу на активованому в'язучому і контрольних) наведені нижче:

$$F_a(\text{цикли}) = 348 + 86x_1 + 28x_2 + 29x_2^2 - 39x_3 + 29x_3^2 - 21x_4^2 - 9x_1x_3 - 13x_1x_2 - 13x_2x_3 - 13x_3x_4 \quad (3)$$

$$F_k(\text{цикли}) = 310 + 86x_1 + 25x_2 + 13x_2^2 - 36x_3 + 13x_3^2 - 12x_4^2 - 13x_1x_2 - 13x_2x_3 - 13x_3x_4 \quad (4)$$

Як бачимо з наведених вище ЕС-моделей, температура ізотермічної витримки істотно не впливає на морозостійкість досліджених бетонів. На рис.2 наведено діаграми у вигляді кубів, що відображають вплив кількості в'язучого, мікрокремнезему і меленого шлаку на морозостійкість досліджених бетонів (рис.2а – склад на активованому в'язучому, рис.2б – контрольний склад). При побудові діаграми фактор  $x_4$  як малозначущий зафіксований на середньому рівні ( $x_4 = 0$ ).

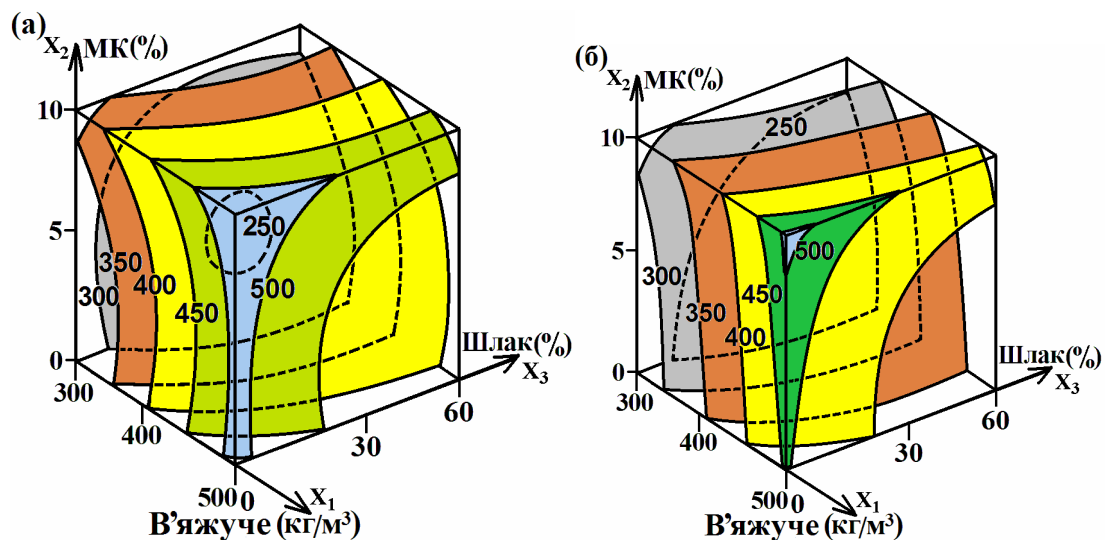


Рисунок 2. Вплив варійованих факторів складу на морозостійкість бетону на композиційному в'язучому: а – активоване в'язуче, б – контрольні склади

Figure 2. Effect of variable factors on frost-resistance of concrete composition on composite binder: a – activated binder, b – control concrete

Аналіз діаграм показує, що найістотніший вплив на морозостійкість бетону справляє кількість в'язучого – при збільшенні його дозування з 300 до 500 кг/м<sup>3</sup> рівень F зростає на 150 циклів і більше. Склад в'язучого також має відчутний вплив на морозостійкість бетонів. При збільшенні частки шлаку в цементі до 60% рівень F для досліджених бетонів знижується приблизно на 50 циклів. Проте практично аналогічне підвищення морозостійкості бетону відбувається в результаті введення в композиційне в'язучого мікрокремнезему. Тобто склади, приготувані на в'язучому з кількістю

клінкерної складової близько 30%, при використанні відповідно 60% шлаку і 10% пуцоланового компонента мають рівень морозостійкості, який практично дорівнює морозостійкості складів на чисто-клінкерному цементі. Це факт свідчить про високу ефективність застосування композиційних цементів з точки зору використання техногенних відходів у складі в'язучого без зниження довговічності виготовлених на ньому бетонів. При застосуванні механоактивації в'язучого морозостійкість виготовлених на цих в'язучих бетонів підвищується на величину до 50-ти циклів. Це, як і ефект підвищення міцності за рахунок активації, можна пояснити зниженням водовмісту сумішей рівної рухливості за рахунок застосування активованого в'язучого і підвищенням потенціалу самого в'язучого.

**Висновки.** Застосування композиційних цементів дозволяє забезпечити високу міцність бетону і його довговічність в умовах знакозмінних температур при високій частці використання у в'язучому техногенного відходу – доменного шлаку. За рахунок механоактивації в'язучого міцність і морозостійкість бетонів може бути додатково підвищена. За необхідності прискорення швидкості набору міцності бетонів на композиційному в'язучому ефективно застосування тепло-влагої обробки, причому з урахуванням необхідності економії ресурсів, температура ізотермічної витримки може бути обмежена 50°C. Отримані в'язучі значно підвищують ефективність застосування відходів металургійної промисловості за рахунок механоактивації та раціонального підбраного складу композиційного цементу.

Також рамках дослідження було визначено оптимальний склад бетону на активованих композиційних в'язучих і розроблено технологічну схему виготовлення бетонів із застосуванням активованих композиційних в'язучих.

**Conclusions.** The use of composite cements provides high strength concrete and its durability under conditions of alternating temperatures with a high proportion of binder is used in industrial waste - blast furnace slag. Due to mechanical activation binder strength and frost resistance of concrete can be further improved. With the need to conserve resources, the temperature of isothermal holding may be limited to 50°C. These binders significantly improve the efficiency of waste iron of steel industry using mechanical activation and management structure chosen composite cement.

#### **Список використаної літератури**

1. Соболев, Х.С. Концепція застосування модифікованих композиційних цементів у будівельному виробництві [Текст] / Х.С. Соболев // Вісник національного ун-ту «Львівська політехніка». – 2004. – №520. – С.179–182.
2. Taylor, H.F.W. Cement Chemistry. Second Edition [Text] / H.F.W. Taylor – London: Thomas Telford pub, 1997. – 459 p.
3. Дворкін, Л.Й. Композиційні в'язучі низької водопотреби, що містять цементний пил [Текст] / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, І.В. Чорна // Вісник ОДАБА. – Вип.48. – Частина 1. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2012. – С.121–129.
4. Фесенко, В.А. Микрокремнезем как активная минеральная добавка [Текст] / В.А. Фесенко // Химические и минеральные добавки в бетон; под. ред. А.Б. Ушера-Маршака. – Харьков: Колорит, 2005. – С.57–60.
5. Барабаш, І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин [Текст] / І.В. Барабаш; навч. посібник. – Одеса: Астропрінт, 2002. – 100 с.
6. Саницький, М.А. Модифіковані композиційні цементы [Текст] / М.А. Саницький, Х.С. Соболев, Т.Е. Марків. – Львів: вид-во Львівської політехніки, 2010. – 130 с.
7. Newman, J. Advanced concrete technology. Constituent material [Text] / J. Newman, B. S. Choo, Edited by John Newman. – London: Butterworth-Heinemann, 2003. – 1920 p.
8. Ghosh, S.N. Advances in cement technology: chemistry, manufacture and testing. Second Edition [Text] / S.N. Ghosh – CRC Press. 2002. – 828 p.
9. Дворкін, Л.Й. Композиційні в'язучі низької водопотреби, що містять цементний пил [Текст] / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін, І.В. Чорна // Вісник ОДАБА. – Вип. 48. – Частина 1. – Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2012. – С.121–129.
10. Барабаш, І.В. Влияние микрокремнезема и молотого шлака на свойства композиционных цементов [Текст] / И.В. Барабаш, Н.А. Зубченко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Випуск 26. – Рівне: НУВГП, 2013. – С.25–30.

11. Вознесенский, В.А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ [Текст] / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.Л. Огарков. – К.: Вища школа, 1989. – 327 с.

*Отримано 02.06.2014*