

**УДК 666.974.6**

**ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ НА МЕХАНОАКТИВОВАНОМУ В'ЯЖУЧОМУ**

**Д-р техн. наук І.В. Барабаш, к-ти техн. наук Л.М. Ксьоншкевич,  
О.М. Крантовська**

**ВИСОКОПРОЧНЫЕ БЕТОНЫ НА МЕХАНОАКТИВИРОВАННОМ ВЯЖУЩЕМ**

**Д-р техн. наук И.В. Барабаш, к-ты техн. наук Л.Н. Ксёншкевич,  
Е.Н. Крантовская**

**HIGH-PERFORMANCE CONCRETE WITH MECHANOACTIVATED BINDER**

**Doct. of techn. sciences I. Barabash, cand. of techn. sciences L. Ksenschkevich, E.  
Krantovskaya**

*У статті розглядаються питання отримання високоміцних бетонів шляхом механоактивації рядового портландцементу з органо-мінеральної добавкою. Проведений*

## Будівельні матеріали, конструкції та споруди

експеримент дозволив встановити вплив незалежних факторів ( $x_1$  - вміст мікрокремнезема в в'язучому -  $5\pm 5\%$ ;  $x_2$  - витрата в'язучого в бетоні -  $450\pm 100\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $x_3$  - питома поверхня ( $S_{\text{num}}$ ) портландцементу -  $400\pm 100\text{м}^2/\text{кг}$ ) на фізико-механічні властивості бетону. Виявлено підвищення міцності бетону у всьому досліджуваному часовому діапазоні (3, 7 і 28 діб).

**Ключові слова:** механоактивація, органо-мінеральна добавка, мікрокремнезем, високоміцний бетон, витрата в'язучого, питома поверхня.

*The paper examines the problems associated with production of high-performance concretes by using a general purpose blended Portland cement with organo-mineral additive. Conducted experiment allowed to establish the influence of independent factors ( $x_1$  - content of microsilica in the binder -  $5 \pm 5\%$ ;  $x_2$  - binder consumption in concrete -  $450 \pm 100 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $x_3$  - specific surface ( $S_{\text{sp}}$ ) of Portland cement -  $400 \pm 100 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) on physical and mechanical properties of concrete. It was established that the use of the mechanoactivated general purpose blended Portland cement with an organomineral additive makes it possible to obtain high-performance concretes which compression strength on the 28th day reaches 120 MPa.*

**Ключевые слова:** механоактивація, органо-мінеральна добавка, мікрокремнезем, портландцемент, високопрочний бетон, расход вяжущего, удельная поверхность.

*The paper examines the problems associated with production of high-performance concretes by using a general purpose blended Portland cement which is to be mechanoactivated and modified with an organomineral additive.*

*The experiment conducted in accordance with a tri-factorial D-optimum design enabled to establish an influence of independent factors ( $x_1$  - content of microsilica in the binder -  $5\pm 5\%$ ;  $x_2$  - binder consumption in concrete -  $450\pm 100 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $x_3$  - specific area ( $S_{\text{sp}}$ ) of Portland cement -  $400\pm 100 \text{ m}^2/\text{kg}$ ) on physical and mechanical properties of concrete. It was established that the use of the mechanoactivated general purpose blended Portland cement with an organomineral additive (microsilica+C-3) makes it possible to obtain high-performance concretes which compression strength on the 28th day reaches 120 MPa.*

**Key words:** mechanoactivation, organomineral additive, microsilica, Portland cement, high-performance concrete, binder consumption, specific area of Portland cement.

**Введение.** Благодаря своим превосходным свойствам – отличному соотношению прочности к средней плотности, высокой плотности и долговечности – высокопрочный бетон все чаще используется для решения различных практических задач строительства.

Применению в отечественной практике строительства бетонов высоких марок способствует все более широкое использование высокоактивных цементов, совершенствование технологических процессов при изготовлении бетонной смеси.

В то же время получение высокоактивного портландцемента, связано, в основном, с увеличением его дисперсности и повышением содержания  $\text{C}_3\text{S}$  а также с целым рядом трудностей технического и технологического порядка.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями.** Постоянное повышение цен на портландцемент, удорожание топлива и энергоносителей обеспечивает особую актуальность

исследованиям, направленным на решение задач снижения материало- и энергоемкости производства строительных материалов и изделий.

Насущная необходимость получения высокопрочных бетонов на базе рядовых цементов заставляет искать новые технологические приемы, использование органо-минеральных добавок (ОМД), в частности, микрокремнезема (МК) и органического модификатора (суперпластификатор С-3) [1, 2].

Значительно усиливает эффект от совместного введения в портландцемент микрокремнезема и органического модификатора механоактивация вяжущего в турбулентных потоках [3, 4].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Работами П.И. Боженова [5], Р.Ф. Руновой [6] и др. установлено, что использование активных минеральных добавок дает реальную возможность получения бетонов с заданными физико-механическими характеристиками при значительной экономии портландцемента.

Среди активных минеральных добавок значительная роль в формировании структуры цементного камня отводится микрокремнезему. Работами К.Ю. Миненко [7], С.С. Каприелова, А.В. Шейнфельда, Ю.Р. Кривобородова [1] В.И. Калашникова, В.С. Демьяновой [8] установлено, что одновременное введение микрокремнезема и поверхностно-активных веществ позволяет резко повысить прочность бетона.

Также существенным резервом повышения прочности бетонов является совершенствование способов приготовления бетонной смеси, в том числе с применением механоактивации вяжущих. В работах И.В. Барабаша, В.Н. Вырового, В.И. Соломатова [4, 9-11], С.И. Федоркина [3] и др. подтверждена положительная роль механоактивации минеральных вяжущих на качество бетона, в том числе, и повышение его прочности.

**Определение целей и задачи исследований.** Целью исследования является повышение эффективности использования рядового портландцемента в высокопрочных бетонах за счет его механоактивации и модификации органо-минеральной добавкой. Задача исследований - изучить влияние механоактивации вяжущего (портландцемент + микрокремнезем + С-3) на механические характеристики бетона.

**Основная часть исследований.** Представлял интерес выяснить совместное влияние органо-минеральной добавки и механоактивации вяжущего на прочность бетона при сжатии ( $f_{cd}$ ). В исследованиях использовался микрокремнезем Никопольского завода ферросплавов. Концентрация микрокремнезема в портландцементе колебалась от 0 до 10%. В качестве вяжущего применялся чистоклинкерный портландцемент (клинкер производства Одесского цементного завода) 3-х удельных поверхностей: 300; 400 и 500 м<sup>2</sup>/кг. Для пластификации в бетонной смеси использовался разжижитель С-3 в количестве 1% (в пересчете на сухое вещество) от массы вяжущего.

Расход вяжущего принимался 350, 450 и 550 кг/м<sup>3</sup>. В качестве заполнителей использовался кварцевый песок с  $M_{кр} = 2,2$  и гранитный щебень фракции 5...20 мм.

Бетонные смеси готовились как по отдельной технологии (РТ) с предварительной активацией вяжущего, так и по традиционной технологии (ТТ). Раздельная технология предусматривала предварительное приготовление активированной суспензии вяжущего в скоростном смесителе-активаторе с последующим совмещением суспензии с мелким и крупным заполнителем в ординарной бетономешалке. Активация суспензии происходила в течении 3-х минут при скорости вращения рабочего ротора смесителя 2800 об/мин.

Для контроля готовились бетонные смеси на немеханоактивированном вяжущем без добавки микрокремнезема. Затворялись такие смеси обычной водой без добавки С-3.

Равноподвижность бетонных смесей достигалось корректировкой расхода воды затворения. Формование образцов-кубов с ребром 10см производилось на лабораторной виброплощадке. Твердение образцов осуществлялось при температуре 18-20<sup>0</sup>С и относительной влажности воздуха не менее 95%.

Исследования проводились по 15-ти точечному трехфакторному Д-оптимальному плану. В эксперименте варьировались следующие независимые факторы:

$x_1$  – содержание микрокремнезема (МК) в портландцементе – 5±5%;

$x_2$  – расход вяжущего в бетоне – 450±100 кг/м<sup>3</sup>;

$x_3$  – удельная поверхность ( $S_{уд}$ ) портландцемента – 400±100 м<sup>2</sup>/кг.

Влияние исследуемых факторов ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) на прочность при сжатии бетона в 3-х, 7- и 28-и суточном возрасте отражено в математических моделях (1–6).

$$f_{cd}^{a3} = 45 + 4,2x_1 + 0,9x_1x_2 + 0,95x_1x_3 + 4,2x_2 - 3,6x_2^2 + 3,5x_3 - 4,8x_3^2 \quad (1)$$

$$f_{cd}^{a7} = 71 + 7,5x_1 + 13x_2 + 5,6x_2^2 + 5,4x_3 - 11,9x_3^2 + 4,7x_2x_3 \quad (2)$$

$$f_{cd}^{a28} = 92,3 + 10,4x_1 + 6,1x_1^2 + 12,1x_2 + 3x_2x_3 + 8,1x_3 - 13,4x_3^2 \quad (3)$$

$$f_{cd}^{k3} = 32 + 2,7x_1 + 3,41x_2 - 1,75x_2^2 + 2,32x_3 - 3,2x_3^2 \quad (4)$$

## Будівельні матеріали, конструкції та споруди

$$f_{cd}^k = 54,7 + 4,9x_1 + 9,3x_2 + 2,7x_2^2 + 3,4x_2x_3 + 4,26x_3 - 10,2x_3^2 \quad (5)$$

$$f_{cd}^{k,28} = 69,4 + 6,8x_1 + 4,9x_1^2 + 1,4x_1x_2 + 8,5x_2 + 2,1x_2x_3 + 6,3x_3 - 12,3x_3^2 \quad (6)$$

Определение показателей прочности при сжатии бетонных образцов производилось по стандартным методикам.

Показатели прочности бетона при сжатии по всем строчкам математического плана приведены в таблице 1.

Коэффициенты при независимых переменных в приведенных математических моделях позволяют сделать вывод о том, что каждый из перечисленных факторов ( $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ) оказывает существенное влияние на прочность бетона как на механоактивированном вяжущем, так и на прочности контрольных образцов.

Подтверждением этому являются графические отображения прочности бетона при сжатии в 28-и суточном возрасте от исследуемых факторов, рис. 1.

Таблица 1

План эксперимента и механические характеристики бетона

| № п/п | Уровни варьирования |    |    | Отклики                            |        |         |  |                                    |        |         |  |
|-------|---------------------|----|----|------------------------------------|--------|---------|--|------------------------------------|--------|---------|--|
|       | x1                  | x2 | x3 | f <sub>cd</sub> <sup>k</sup> , МПа |        |         | f <sub>cd,вод</sub> <sup>k</sup> , МПа | f <sub>cd</sub> <sup>a</sup> , МПа |        |         | f <sub>cd,вод</sub> <sup>a</sup> , МПа |
|       |                     |    |    | 3 сут.                             | 7 сут. | 28 сут. | 28 сут.                                | 3 сут.                             | 7 сут. | 28 сут. | 28 сут.                                |
| 1     | -                   | -  | -  | 18,6                               | 29,5   | 43,6    | 41,8                                   | 25,1                               | 40,4   | 59,7    | 56,4                                   |
| 2     | +                   | -  | -  | 23,8                               | 42,1   | 52,3    | 43,3                                   | 32,2                               | 58,9   | 73,2    | 60,6                                   |
| 3     | -                   | +  | -  | 26,9                               | 45,1   | 53,9    | 49,5                                   | 34,9                               | 63,1   | 75,5    | 64,4                                   |
| 4     | +                   | +  | -  | 29,5                               | 54,3   | 69,5    | 61,4                                   | 39,8                               | 76     | 97,3    | 85,9                                   |
| 5     | -                   | -  | +  | 24,8                               | 34,8   | 52,7    | 44,8                                   | 33,5                               | 45,3   | 68,5    | 58,2                                   |
| 6     | +                   | -  | +  | 27,6                               | 40,8   | 64,3    | 51,3                                   | 38,6                               | 57,1   | 90      | 71,8                                   |
| 7     | -                   | +  | +  | 29,1                               | 60,9   | 72,8    | 69,3                                   | 37,9                               | 82,2   | 98,3    | 90,1                                   |
| 8     | +                   | +  | +  | 37,4                               | 69,6   | 88,4    | 71,3                                   | 52,4                               | 97,4   | 123,8   | 99,8                                   |
| 9     | -                   | 0  | 0  | 28,6                               | 47,3   | 64,9    | 55,9                                   | 40                                 | 61,5   | 84,4    | 72,7                                   |
| 10    | +                   | 0  | 0  | 36,2                               | 60,1   | 81,4    | 67,5                                   | 50,7                               | 78,1   | 105,8   | 94,5                                   |
| 11    | 0                   | -  | 0  | 26,9                               | 52,5   | 61,6    | 57,6                                   | 37,7                               | 70,9   | 83,2    | 77,8                                   |
| 12    | 0                   | +  | 0  | 32,9                               | 62,3   | 75,2    | 66,1                                   | 44,4                               | 84,1   | 101     | 89,2                                   |
| 13    | 0                   | 0  | -  | 26,9                               | 40,7   | 53,9    | 50,4                                   | 37,7                               | 54,9   | 72,8    | 68,0                                   |
| 14    | 0                   | 0  | +  | 30                                 | 48,2   | 58,1    | 50,5                                   | 42                                 | 65,1   | 78,4    | 68,2                                   |
| 15    | 0                   | 0  | 0  | 32,2                               | 56,6   | 73,4    | 63,5                                   | 45,1                               | 73,6   | 99,1    | 89,8                                   |

**Примечание:** f<sub>cd</sub><sup>a</sup>, МПа - прочность при сжатии бетона на механоактивированном вяжущем; f<sub>cd</sub><sup>k</sup>, МПа - прочность при сжатии бетона (контроль); f<sub>cd,вод</sub><sup>a</sup>, МПа - прочность при сжатии бетона в водонасыщенном состоянии на механоактивированном вяжущем; f<sub>cd,вод</sub><sup>k</sup>, МПа - прочность при сжатии бетона в водонасыщенном состоянии (контроль)

В частности установлено, что введение в состав вяжущего микрокремнезема приводит к увеличению прочности бетона. Это характерно как для бетона на механоактивированном вяжущем так и для бетона, вяжущее которого не подвергалось активации, рис. 2.

Наибольший прирост прочности достигается в 7-ми суточном возрасте –

прочность бетона (f<sub>cd</sub>=59МПа), на механоактивированном вяжущем с содержанием 10 % микрокремнезема превышает прочность бетона (f<sub>cd</sub>=40 МПа) на бездобавочном портландцементе почти в 1,5 раза. В 28-ми суточном возрасте разность между прочностью бетона уменьшается, но не опускается ниже 20-25%. Повышение прочности бетона при введении в вяжущее



Это характерно как для бетонов на механоактивированном вяжущем, так и для контроля (рис.2 а, б). Введение в портландцемент микрокремнезема приводит к увеличению прочности бетона по сравнению с бездобавочным вяжущем на 11% (МК=5%) и на 12,5% при содержании МК=10%, рис 2а.

Введение 10% микрокремнезема в вяжущее приводит к повышению прочности бетона с 52,3 МПа до 64,3 МПа. Для бетона на механоактивированном вяжущем введение в портландцемент 10% микрокремнезема приводит к увеличению прочности бетона при сжатии с 72,3 до 90 МПа.

Механоактивация портландцемента с 10%-ым содержанием микрокремнезема в присутствии суперпластификатора С-3 позволяет достигать бетоном в 3-х суточном возрасте прочность при сжатии свыше 50МПа. К 7-и суточному возрасту прочность бетона практически удваивается, а к 28-и суточному возрасту достигает значения 124МПа.

Таким образом, механоактивация портландцемента, содержащего 10% микрокремнезема, позволяет увеличить прочность бетона в 28-и суточном возрасте в 1,9÷2,2 раза по сравнению с контролем.

**Выводы с исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.** Приведенные графические зависимости свидетельствуют о том, что управляя технологией приготовления бетонной смеси (активация, контроль), а также содержанием микрокремнезема в вяжущем, удельной поверхностью портландцемента и расходом вяжущего, можно регулировать прочность бетона, твердение которого проходит в нормальных условиях, в пределах от 43,6 до 123,8 МПа.

Целью дальнейших исследований является изучение долговечности полученных высокопрочных бетонов на механоактивированном вяжущем по критериям морозостойкости, трещиностойкости и т.п.

### *Список использованных источников*

1. Каприелов, С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона. [Текст] / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.Р. Кривобородов // Бетон и железобетон, 1992. № 7. - С.4-7.
2. Батраков, В.Г. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон. [Текст] / В.Г. Батраков, С.С. Каприелов, Ф.М. Иванов, А.В. Шейнфельд. // Бетон и железобетон, 1990, № 12, С.15-17.
3. Федоркин, С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов. - Симферополь: Таврия, 1997.-180с.
4. Барабаш, І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин. - Навчальний посібник. - Одеса. Астропрінт, 2002. - 100с.
5. Баженов, Ю.М. Технология бетона. [Текст] / Ю.М. Баженов. – М.: Изд-во АВС, 2003. - 500 с.
6. Рунова, Р.Ф. Формирование структуры высокопрочных бетонов. [Текст] / Р.Ф. Рунова, И.И. Руденко, В.В. Троян, В.В. Товстонис, С.П. Щербина, Л.Д. Пашина // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка №29, 2008 р., с.91-97.
7. Миненко, Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами: Дис. канд. техн. наук: 05.23.05: Пенза – 2004, 157 с.
8. Демьянова, В. С. Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах. [Текст] / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, А.А. Борисов // Жил. стр-во.1999, № 1.
9. Барабаш, І.В., Интенсивная раздельная технология бетонов на наполненном известковом вяжущем. [Текст] /И.В. Барабаш, В.И. Соломатов //– Строительные материалы. – 1992. - № 1. – С. 4-5
10. Барабаш, І.В. Механизмы организации структуры механоактивированных грубодисперсных систем. – В зб.: Композиційні матеріали для будівництва. [Текст] /И.В. Барабаш, В.Н. Выровой //– Вісник ДДАБА. – 2000. – 2 (22). – Макіївка. – С.12-15.

11. Соломатов, В.И., Дворкин Л.И., Чудновский С.М. Пути активации наполнителей композиционных материалов // Изв. вузов. Стр-во и арх.-ра. – 1987. - № 1. – С. 60-63.

---

Барабаш Иван Васильевич д-р техн. наук, профессор кафедры городского строительства и хозяйства Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.:(097)549-39-41 E-mail: [dekansti@ukr.net](mailto:dekansti@ukr.net)

Ксёньшевич Любовь Николаевна к-т техн. наук, доцент кафедры городского строительства и хозяйства Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.: (066)917-06-88 E-mail: [w1-ksm@mail.ru](mailto:w1-ksm@mail.ru)

Крантовская Елена Николаевна к-т техн. наук, доцент кафедры сопротивления материалов Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел.: (066)047-45-10 E-mail: [elena12122007@mail.ru](mailto:elena12122007@mail.ru)

Barabash Ivan Vasilyevich Dr., Prof., Chair of Urban Development and Municipal Engineering Odessa State Academe of Civil Engineering and Architecture Tel.:(097)549-39-41 E-mail: [dekansti@ukr.net](mailto:dekansti@ukr.net)

Ksenshkevich L. Nikolaevna Cand. Sc., Assistant Prof. Chair of Urban Development and Municipal Engineering Odessa State Academe of Civil Engineering and Architecture Tel.:(066)917-06-88 E-mail: [w1-ksm@mail.ru](mailto:w1-ksm@mail.ru)

Krantovskaya E. Nikolaevna, Cand. Sc. (Eng.), Assistant Prof. Chair of Strength of Materials Odessa State Academe of Civil Engineering and Architecture Tel.:(066)047-45-10 E-mail: [elena12122007@mail.ru](mailto:elena12122007@mail.ru)