

УДК 666.9.022

к.т.н., доцент Ксєншкевич Л.Н., wlksms@gmail.com,  
orcid 0000-0001-9619-4855,

д.т.н., профессор Барабаш И.В., dekansti@ukr.net, orcid 0000-0003-0241-4728,

к.т.н., доцент Крантовская Е.Н., elena14122007@gmail.com,  
orcid 0000-0001-6182-7691,

Одесская государственная академия строительства та архитектуры

## ВЫСОКОПРОЧНЫЙ БЕТОН НА МЕХАНОАКТИВИРОВАННОМ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТЕ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

*Рассматриваются вопросы получения высокопрочных бетонов путем механоактивации рядового портландцемента с органо-минеральной добавкой.*

*Проведенный эксперимент позволил установить влияние независимых факторов ( $x_1$  - содержание микрокремнезема в вяжущем -  $5 \pm 5\%$ ;  $x_2$  - расход вяжущего в бетоне -  $450 \pm 100$  кг/м<sup>3</sup>;  $x_3$  - удельная поверхность ( $S_{уд}$ ) портландцемента -  $400 \pm 100$  м<sup>2</sup>/кг) на физико-механические свойства бетона.*

*Установлено, что использование механоактивированного рядового портландцемента с органо-минеральной добавкой (микрокремнезем+С-3) позволяет получать высокопрочные бетоны с прочностью при сжатии в 28-и суточном возрасте до 120 МПа.*

*На базе полученных математических моделей, отражающих влияние независимых факторов на физико-механические свойства высокопрочного бетона проведена оптимизация составов высокопрочных бетонов.*

*Ключевые слова: механоактивация, органо-минеральная добавка, микрокремнезем, портландцемент, высокопрочный бетон, расход вяжущего, удельная поверхность.*

**Постановка проблемы.** Возможности повышения качества бетона, более интенсивного набора прочности, особенно в ранние сроки твердения, могут быть осуществлены путем целенаправленного изменения структуры цементного камня, как за счет активации зерен цемента и микрокремнезема [1] в условиях интенсивных гидродинамических воздействий на них, так и за счет модификации их поверхности добавками ПАВ [2, 3].

Работами П.И. Боженова [4], Р.Ф. Руновой [5] 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.

Также существенным резервом повышения прочности бетонов является совершенствование способов приготовления бетонной смеси, в том числе с применением механоактивации вяжущих. В работах И.В. Барабаша [6], С.И. Федоркина [7] и др. подтверждена положительная роль механоактивации минеральных вяжущих на качество бетона, в том числе, и повышение его прочности.

**Цели 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.

**Результаты исследований.** Представлял интерес выяснить совместное влияние механоактивации вяжущего и органо-минеральной добавки на прочность бетона при сжатии.

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.

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). Активация суспензии происходила в течении 3 – х минут при скорости вращения рабочего ротора смесителя 2800 об/мин. Для контроля готовились бетонные смеси с ОК=3см на не механоактивированном вяжущем без добавки микрокремнезема и разжижителя С-3.

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

Был поставлен трехфакторный эксперимент, в котором варьировались следующие факторы:  $X_1$  – содержание микрокремнезема в портландцементе (по массе) – 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.

Показатели прочности бетона при сжатии (на 28-е сутки) приведены в табл. 1.

Графическая интерпретация математических моделей, описывающих совместное влияние исследуемых рецептурно-технологических факторов на прочность бетона при сжатии свидетельствуют о том, что механоактивация вяжущего способствует резкому повышению прочности бетона во всем исследуемом факторном пространстве рис. 1, 2.

Анализ моделей показывает, что прочность бетонов приготовленных по отдельной технологии выше прочности бетонов приготовленных по традиционной технологии за весь исследуемый период (1 - 28 сут).

Таблица 1.

План эксперимента и механические характеристики бетона

№ п/п	Уровни варьируван ия			МК, %	Расход вяжущего, кг/м <sup>3</sup>	Удельная поверхность Цемент S <sub>уд.</sub> м <sup>2</sup> /кг	Отклики			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>				f <sub>cube,к</sub> <sup>к</sup> МПа	f <sub>cube,вод,к</sub> <sup>к</sup> МПа	f <sub>cube,а</sub> <sup>а</sup> МПа	f <sub>cube,вод,а</sub> <sup>а</sup> МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	-	-	0	350	300	43,6	41,8	59,7	56,4
2	+	-	-	10	350	300	52,3	43,3	73,2	60,6
3	-	+	-	0	550	300	53,9	49,5	75,5	64,4
4	+	+	-	10	550	300	69,5	61,4	97,3	85,9
5	-	-	+	0	350	500	52,7	44,8	68,5	58,2
6	+	-	+	10	350	500	64,3	51,3	90	71,8
7	-	+	+	0	550	500	72,8	69,3	98,3	90,1
8	+	+	+	10	550	500	88,4	71,3	123,8	99,8
9	-	0	0	0	450	400	64,9	55,9	84,4	72,7
10	+	0	0	10	450	400	81,4	67,5	105,8	94,5
11	0	-	0	5	350	400	61,6	57,6	83,2	77,8
12	0	+	0	5	550	400	75,2	66,1	101	89,2
13	0	0	-	5	450	300	53,9	50,4	72,8	68,0
14	0	0	+	5	450	500	58,1	50,5	78,4	68,2
15	0	0	0	5	450	400	73,4	63,5	99,1	89,8

Так, если прочность контрольных образцов бетона при сжатии в возрасте 3 суток нормального твердения колеблется в диапазоне от 15 до 37 МПа в

зависимости от расхода вяжущего, удельной поверхности портландцемента и содержания микрокремнезема, то предварительная механоактивация портландцемента повышает этот показатель до 27...58 МПа (рис.1а). В возрасте 28 суток применение механоактивации увеличивает прочность бетона с 45...84 МПа (рис.2б) до 56...112 МПа (рис.1б).

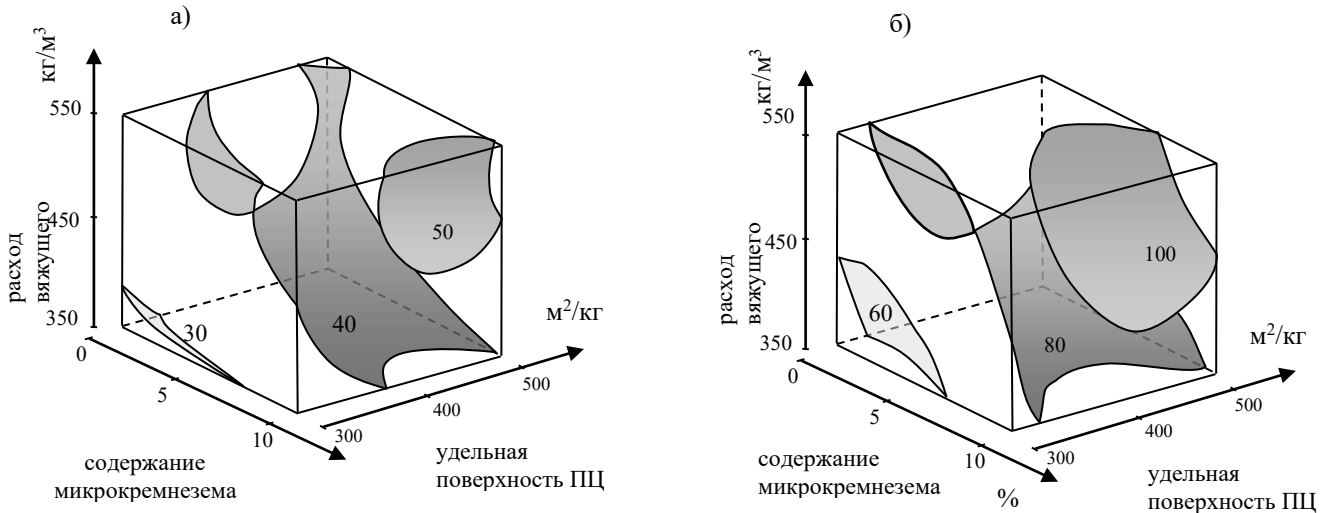


Рис.1. Прочность при сжатии бетонов на механоактивированном вяжущем  
а – в возрасте 3 суток; б – в возрасте 28 суток

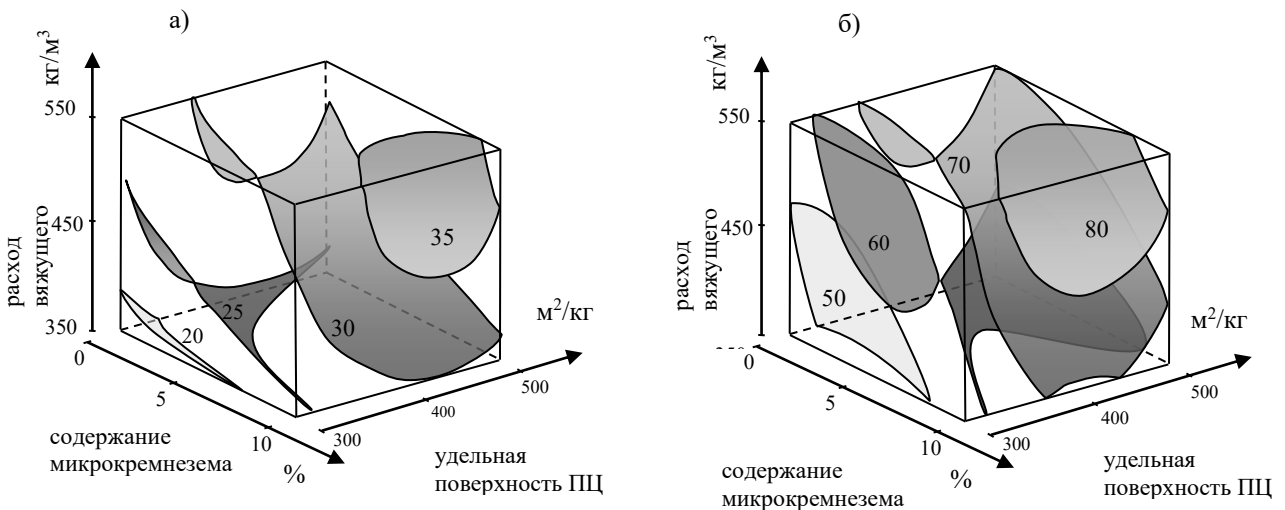


Рис.2. Прочность при сжатии бетонов на немеханоактивированном вяжущем  
а – в возрасте 3 суток; б – в возрасте 28 суток

Выбор нескольких вариантов оптимальных составов высокопрочных бетонов был проведен графическим методом по диаграммам, построенным по соответствующим ЭС-моделям.

На куб были наложены изолинии, отображающие уровни основных физико-механических свойств механоактивированного бетона в возрасте 28 суток, а области, не удовлетворяющие по критериям ограничения, были исключены (рис.3). В качестве критериев ограничения были приняты: прочность при сжатии бетона не ниже 100 МПа; коэффициент размягчения бетона не ниже 0.85 ( $K_p \geq 0.85$ ). Далее в оставшейся, т.е не исключенной ни по одному из названных выше критериев, части факторного пространства были избраны оптимальные составы с учетом желательных критериев – водопоглощения и удельной поверхности вяжущего.

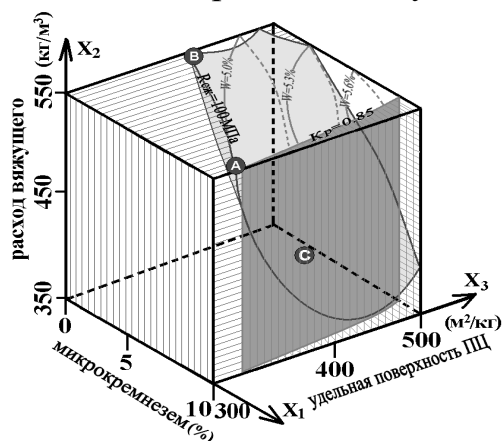


Рис.3. Выбор оптимальных составов высокопрочных бетонов по 3-х мерной диаграмме

– введении микрокремнезема. Помимо того, состав В показывает меньшее водопоглощение по сравнению с составом А, что говорит о его большей потенциальной долговечности. Несомненно, в трехмерном пространстве могут быть выбраны и другие технологические решения в зависимости от необходимых задач.

**С** – при расходе вяжущего 450 кг/м<sup>3</sup>, удельной поверхности вяжущего около 380 м<sup>2</sup>/кг и при отсутствии микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать с точки зрения снижения расхода вяжущего.

Таким образом, отобраны три рекомендуемых оптимальных составов высокопрочных бетонов, каждый из которых может быть использован в зависимости от требуемых для конкретной задачи уровней прочности и экономической целесообразности с учетом текущих цен на энергоносители, оборудование и сырье.

**Вывод:** 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

**А** – при расходе вяжущего 550 кг/м<sup>3</sup>, относительно низкой удельной поверхности вяжущего (около 320 м<sup>2</sup>/кг) и при использовании 10 % микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать исходя из экономии энергии на размол вяжущего.

**В** – при расходе вяжущего 550 кг/м<sup>3</sup>, средней удельной поверхности вяжущего (около 400 м<sup>2</sup>/кг) и без микрокремнезема. Данный состав можно рекомендовать с точки зрения отсутствия необходимости в дополнительной технологической операции

прочность бетона, твердение которого проходит в нормальных условиях, в пределах от 41,8 до 123,8 МПа.

### Список литературы

1. Каприелов С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Ю.Р.Кривобородов // Бетон и железобетон. – 1992. – №7. – С.4-7.
2. Ramakrishnan V. Workability and strength of superplastifised concrete/ V. Ramakrishnan, W. Coyle, S. Pande // Indian Concrete J. – 1980. – Vol. 54. – № 1. – P. 23-26.
3. Constitutive modeling o/ high strength/high performance concrete, FIB Bulletin 42, Sprint-Digital-Druck, Stuttgart, 2008. – 125 p.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Изд-во АВС, 2003. – 500 с.
5. Рунова Р.Ф. Формирование структуры высокопрочных бетонов. /Р.Ф. Рунова, И.И. Руденко, В.В. Троян, В.В. Товстонис, С.П. Щербина, Л.Д. Пашина // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка.,–2008 р. –№29. – С.91-97.
6. Барабаш І.В. Механохімічна активація мінеральних в'язучих речовин.- Навчальний посібник. – Одеса. Астропрінт, 2002. – 100с.
7. Федоркин С.И. Механоактивация вторичного сырья в производстве строительных материалов. – Симферополь: Таврия, 1997. – 180с.

к.т.н., доцент Ксьоншкевич Л.М.,  
д.т.н., професор Барабаш І.В.,  
к.т.н., доцент Крантовська О.М.,

Одеська державна академія будівництва та архітектури

## ВИСОКОМІЦНИЙ БЕТОН НА МЕХАНОАКТИВОВАНОМУ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

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

Проведений 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 ( $S_{\text{пит}}$ ) портландцементу -  $400\pm 100\text{м}^2/\text{кг}$ ) на фізико-механічні властивості бетону.

Встановлено, що використання механоактивованого рядового портландцементу з органо-мінеральної добавкою (мікрокремнезем + С-3)

дозволяє отримувати високоміцні бетони з міцністю при стисканні в 28-ми добовому віці до 120 МПа.

На базі отриманих математичних моделей, що відображають вплив незалежних факторів на фізико-механічні властивості високоміцного бетону проведена оптимізація складів високоміцних бетонів.

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

Ksenshkevich L. M. PhD, Assistant Professor,  
Barabash I.V. D.Sc., Professor,  
Krantovska O. M. PhD, Assistant Professor,  
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

### **HIGH-STRENGTH CONCRETE ON MEHANOACTIVATED PORTLANDCEMENT FOR URBAN DEVELOPMENT OBJECTS**

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

The experiment conducted in accordance with a three-factor 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 -  $450\pm 100$  kg/m<sup>3</sup>;  $x_3$  – specific area ( $S_{sp}$ ) of Portland cement -  $400\pm 100$  m<sup>2</sup>/kg) on physical and mechanical properties of concrete.

It was established that the using 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.

Optimization of concrete mixes was achieved on the basis of obtained mathematical models that reflect the influence of independent factors on physical and mechanical properties of a high-performance concrete.

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