

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.3:669.431.6

В. И. БОЛЬШАКОВ<sup>1</sup>, М. А. ЕЛИСЕЕВА<sup>2\*</sup>, С. А. ЩЕРБАК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Материаловедение и обработка металлов», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. - 5: +(056) 745 23 72, эл. почта bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup>Каф. «Реконструкция и управление в строительстве», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (096) 377 01 36, эл. почта SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

<sup>3</sup>Каф. «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (095) 243 32 09, эл. почта aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

### ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ И ОСНОВНЫМИ СВОЙСТВАМИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ

**Цель.** В статье необходимо провести установление закономерностей влияния состава мелкозернистых бетонов, получаемых на основе доменных гранулированных шлаков, и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе на основные свойства материала. **Методика.** Для достижения поставленной цели в работе использован полнофакторный эксперимент типа  $2^2$ . В качестве переменных были приняты: соотношение между цементом и доменным гранулированным шлаком ( $X_1$ ) и продолжительность обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе ( $X_2$ ). Выходными факторами, т.е. контролируемыми свойствами, были: ранняя прочность в 7-суточном возрасте ( $Y_1=f_7_{сут}$ ), стандартная прочность в 28-суточном возрасте ( $Y_2=f_{28_{сут}}$ ) и средняя плотность бетона ( $Y_3=\rho$ ), твердеющего в нормальных условиях. **Результаты.** Анализ полученных моделей регрессии свидетельствует о том, что с уменьшением содержания заполнителя в составе бетона и повышением продолжительности обработки смеси в смесителе-активаторе прочность в разные сроки твердения и плотность бетона возрастают. При этом большее влияние на свойства бетона имеет изменение состава смеси. Так, при одинаковом времени обработки смеси прочность бетона в возрасте 28 суток понижается примерно на 30 % между составом 1:3 и 1:4; на 22 % – между составом 1:4 и 1:5; на 13 % – между составом 1:5 и 1:6. Та же закономерность прослеживается и для ранней прочности бетона. Плотность бетона мало изменяется, ее кривая расположена практически в одной плоскости. Так, при равной продолжительности обработки смеси различие значений плотности для состава 1:3 и 1:9 составляет 7,6 %. Увеличение времени обработки смеси на 6 с во всем исследуемом диапазоне дает прирост прочности в 28-суточном возрасте примерно на 7–8 % для всех составов. Значение ранней прочности изменяется на 12–14 % между смесью, обработанной за 30 и 36 с. Затем на каждое последующее увеличение продолжительности обработки на 6 с это различие снижается на 1 % для всех составов. Изменение плотности бетона при варьировании времени обработки смеси фактически не изменяется и составляет 1–2 % при интервале в 6 с во всем исследуемом диапазоне для всех составов. **Научная новизна.** Впервые определены уравнения регрессии, связывающие продолжительность активации мелкозернистой бетонной смеси и ее состав с основными свойствами бетона. **Практическая значимость.** Получены уравнения регрессии и графические поверхности, по которым можно определить показатели технологических факторов, которые

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

обеспечивают получение заданной ранней, стандартной прочности и средней плотности механоактивированного мелкозернистого бетона.

*Ключевые слова:* механоактивированные мелкозернистые бетоны; доменные гранулированные шлаки; технологические факторы; ранняя прочность бетона; стандартная прочность бетона; средняя плотность бетона

### Введение

С каждым годом вопросы ресурсосбережения и снижения материалоемкости в отрасли производства бетонов становятся все острее и актуальнее. Этого можно достигнуть путем вовлечения вторичных материальных ресурсов в качестве основного сырья, изготавливаемых строительных материалов и изделий, а также проведения специальных технологических операций, способствующих полному раскрытию и проявлению потенциальных возможностей используемых исходных веществ, что позволит сократить их расход. Так, по нашему мнению, при производстве мелкозернистых бетонов в качестве основного сырья целесообразно применять доменные гранулированные шлаки, образующиеся в результате охлаждения побочных продуктов металлургической промышленности – огненно-жидких шлаков. А для повышения его химической активности и улучшения ряда других свойств, а также полного использования реакционной возможности цемента и исключения в составе новообразований бетона зерен непрогидратировавших клинкерных минералов проводить механоактивацию компонентов мелкозернистой бетонной смеси в смесителе-активаторе роторного типа. Технические характеристики и принцип действия данной установки раскрыты нами в работах [2; 10]. Это позволяет отказаться от природного ископаемого песка и снизить расход цемента в составе бетона при сохранении его эксплуатационных характеристик.

Проблеме эффективного использования доменных гранулированных шлаков с учетом структурных и прочих особенностей данного сырья посвящено множество работ и украинских, российских ученых [4; 5; 6; 7; 9; 11; 12], и авторов дальнего зарубежья [13–16]. Имея сходный химический состав (основные окислы CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO) с традиционными строительными материалами – песком, цементом и др. доменный гранулированный шлак является дешевым и эффективным их заменителем. Так, в работах [5; 6; 7] ученые часть

мелкого заполнителя песка в составе легких бетонов для подстилающего слоя полов рекомендуют заменить на доменный гранулированный шлак в определенном их соотношении, обеспечивающем рациональный зерновой состав компонентов бетона. В [14] авторы предлагают составы бетонов, содержащих природные и промышленные минеральные добавки (туф, доменный гранулированный шлак, золу-унос), которые заменяют часть цемента.

### Цель

Установление закономерностей влияния состава мелкозернистых бетонов, получаемых на основе доменных гранулированных шлаков и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе, на основные свойства материала.

### Методика

Для достижения поставленной цели в работе использован полнофакторный эксперимент типа 2<sup>2</sup>. В качестве переменных были приняты: соотношение между цементом и доменным гранулированным шлаком ( $X_1$ ) и продолжительность обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе ( $X_2$ ). Выходными факторами, то есть контролируемыми свойствами, были приняты ранняя прочность в 7-суточном возрасте ( $Y_1=f_{7\text{сут}}$ ), стандартная прочность в 28-суточном возрасте ( $Y_2=f_{28\text{сут}}$ ) и средняя плотность бетона ( $Y_3=\rho$ ), твердевшего в нормальных условиях.

### Результаты

При разработке новых составов бетонов, технологии изготовления которых отличаются от общепринятых традиционных, важно установить взаимосвязь между технологическими факторами и основными свойствами изготавливаемого материала. Это позволит получать бетон необходимого качества с заданными ранней, стандартной прочностью и средней плотностью при минимальной его себестоимости

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

через регулирование определенных значений технологических факторов.

Для этого использовался полнофакторный эксперимент типа  $2^2$ . При проведении исследований применялись литературные данные следующих авторов: В. А. Вознесенского, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огаркова, Ю. М. Баженова и Н. М. Ершовой [1; 3; 8].

В качестве технологических факторов были приняты соотношения между цементом и доменным гранулированным шлаком ( $X_1$ ) и продолжительность обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе ( $X_2$ ). Выходными факторами, то есть контролируемыми свойствами, были: ранняя прочность в 7-суточном возрасте ( $Y_1=f_{7\text{сут}}$ ), стандартная прочность в 28-суточном возрасте ( $Y_2=f_{28\text{сут}}$ ) и средняя плотность бетона ( $Y_3=\rho$ ), твердевшего в нормальных условиях. Условия планирования эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Условия планирования эксперимента

Table 1

## Terms of experiment design

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Состав бетона Ц:Ш	$X_1$	1:3	1:6	1:9	1:3
Продолжительность обработки, с	$X_2$	30	45	60	15

Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний образцов представлены в табл. 2.

На основании экспериментальных данных, по формулам работ [3; 8], рассчитаны значения коэффициентов уравнений регрессии. Результаты сведены в табл. 3.

Вычисленные значения доверительного интервала для коэффициентов уравнений регрес-

сии  $f_{7\text{сут}}$ ,  $f_{28\text{сут}}$  и  $\rho$  равны 0,8682; 1,991 и 128 соответственно. Коэффициенты уравнений регрессии, абсолютные значения которых были меньше значения доверительного интервала, признавались незначимыми и вместе с соответствующими им членами уравнения исключались из него согласно [1; 3; 8].

После уточнения получены следующие уравнения регрессии, которые характеризуют взаимосвязь между параметрами оптимизации и технологическими факторами:

– ранняя прочность бетона в 7-суточном возрасте

$$f_{7\text{сут}} = 11,42 - 8,33 \cdot X_1 + 2,93 \cdot X_2 - 1,82 \cdot X_1 \cdot X_2;$$

– стандартная прочность бетона в 28-суточном возрасте

$$f_{28\text{сут}} = 20,1075 - 12,2175 \cdot X_1 + 3,4925 \cdot X_2;$$

– средняя плотность бетона

$$\rho = 1919,5 - 105,5 \cdot X_1 + 61,5 \cdot X_2.$$

Расчетные значения критерия Фишера для  $f_{7\text{сут}}$ ,  $f_{28\text{сут}}$  и  $\rho$  равны 0; 2,5036 и 0,732 соответственно, что меньше табличных данных (6,39; 6,59 и 6,59), а значит, уравнения регрессии адекватно описывают результаты эксперимента. Анализ полученных моделей регрессии свидетельствует о том, что наибольшее влияние на исследуемые характеристики бетона имеет соотношение вяжущего и заполнителя в составе бетонной смеси.

На основе полученных уравнений регрессии построены графические поверхности влияния состава бетона и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе на раннюю прочность в 7-суточном возрасте, стандартную прочность в 28-суточном возрасте и среднюю плотность бетона (рис. 1).

Результаты планирования свидетельствуют о том, что с уменьшением содержания заполнителя в составе бетона и повышением продолжительности обработки смеси в смесителе-активаторе, прочность в разные сроки твердения и плотность бетона возрастают. При этом большее влияние на свойства бетона имеет изменение состава смеси. Так, при одинаковом времени обработки смеси, прочность бетона в 28 суток понижается примерно на 30 % между составом 1:3 и 1:4, на 22 % между составом

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

1:4 и 1:5, на 13 % между составом 1:5 и 1:6. Как видно, существенная разница в прочности наблюдается у жирных смесей. С уменьшением содержания цемента в составе бетона значения прочности выравниваются, а кривая на рис. 1, б становится более пологой.

Таблица 2

**Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний образцов**

Table 2

**Matrix of experiment design and the results of samples tests**

№ п/п	Исследуемые факторы		$f_{7 \text{ сут}}$ – ранняя прочность образцов бетона в 7-суточном возрасте, МПа		
	$X_1$	$X_2$	$f_1$	$f_2$	$f_{\text{ср.}}$
1	+1	-1	2,07	1,89	1,98
2	-1	+1	25,4	23,6	24,5
3	-1	-1	15,8	14,2	15
4	+1	+1	4,4	4,0	4,2

Окончание табл. 2

End of table 2

№ п/п	$f_{28 \text{ сут}}$ – стандартная прочность образцов бетона в 28-суточном возрасте, МПа			$\rho$ – плотность образцов бетона, кг/м <sup>3</sup>		
	$f_1$	$f_2$	$f_{\text{ср.}}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_{\text{ср.}}$
1	6,69	6,03	6,36	1 825	1 745	1 785
2	39,83	35,73	37,78	2 132	2 106	2 119
3	28,54	25,2	26,87	1 963	1 899	1 931
4	9,91	8,93	9,42	1 907	1 779	1 843

Таблица 3

**Коэффициенты уравнений регрессии**

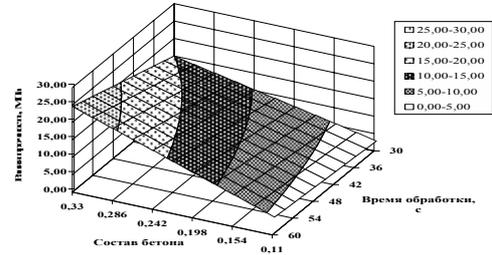
Table 3

**Coefficients of regression equations**

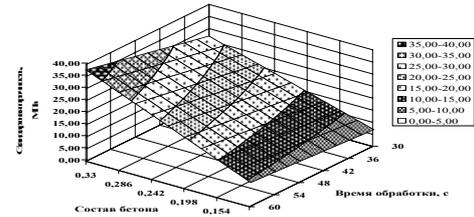
Параметр оптимизации	Коэффициенты уравнений регрессии	
	$b_0$	$b_1$
$f_{7 \text{ сут}}$	11,42	-8,33
$f_{28 \text{ сут}}$	20,1075	-12,2175
$\rho$	1919,5	-105,5
$f_{7 \text{ сут}}$	2,93	-1,82

$f_{28 \text{ сут}}$	3,4925	-1,96
$\rho$	61,5	-32,5

a–a



б–б



в–в

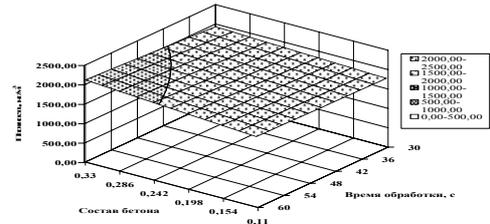


Рис. 1. Влияние состава бетона и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе на:  
 а – раннюю прочность в 7-суточном возрасте;  
 б – стандартную прочность в 28-суточном возрасте;  
 в – среднюю плотность бетона

Fig. 1. Effect of concrete mix and the processing time of concrete mix in the agitator mixer for:  
 a – early strength in 7-days of age; b – standard strength in 28 days of age;  
 c – the average density of concrete

Та же закономерность прослеживается и для ранней прочности бетона. Плотность бетона мало изменяется, ее кривая расположена практически в одной плоскости. Так, при равной продолжительности обработки смеси, различие значений плотности для состава 1:3 и 1:9 составляет 7,6 %. Увеличение времени обработки смеси на б с во всем исследуемом диапазоне дает прирост прочности в 28-суточном возрасте примерно на 7–8 % для всех составов. Значение ранней прочности изменяется на 12–14 % между смесью, обработанной 30 и 36 с. Затем на каждое последующее увеличение продолжи-

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тельности обработки на 6 с это различие снижается на 1 % для всех составов. Изменение плотности бетона при варьировании времени обработки смеси фактически не изменяется и составляет 1–2 % при интервале в 6 с во всем исследуемом диапазоне для всех составов.

### Научная новизна и практическая значимость

Впервые определены уравнения регрессии, связывающие продолжительность активации мелкозернистой бетонной смеси и ее состав с основными свойствами бетона.

Практическая значимость. Получены уравнения регрессии и графические поверхности, по которым можно определить показатели технологических факторов, которые обеспечивают получение заданной ранней, стандартной прочности и средней плотности механоактивированного мелкозернистого бетона.

### Выводы

В ходе проведенных исследований было определено влияние состава бетона и продолжительности обработки бетонной смеси в смесителе-активаторе на раннюю, стандартную прочность и среднюю плотность бетона; получены уравнения регрессии, адекватно описывающие результаты эксперимента; построены графические поверхности влияния технологических факторов на исследуемые свойства материала. Анализ полученных моделей регрессии свидетельствует о том, что наибольшее влияние на исследуемые характеристики бетона имеет соотношение вяжущего и заполнителя в составе бетонной смеси. В зависимости от концентрации доменного гранулированного шлака в составе бетона можно получить изделия с классом прочности от С 5 до С 25 при средней плотности от 1 818 до 2 033 кг/м<sup>3</sup>.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов, Ю. М. Технология бетонов : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / Ю. М. Баженов. – Москва : АСВ, 2002. – 500 с.
2. Большаков, В. И. Влияние высокоскоростной обработки доменных гранулированных шлаков на их свойства / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, С. А. Щербак // Вісн. Придніпр. держ.

акад. буд-ва та архіт. – Дніпропетровськ, 2013. – № 8. – С. 4–9.

3. Вознесенский, В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ : учебник / В. А. Вознесенский, Т. В. Ляшенко, Б. Л. Огарков. – Київ : Вища шк., 1989. – 328 с.
4. Лужно-активовані шлакопортландцементи / П. В. Кривенко, О. М. Петропавловський, О. Г. Гелевера [та ін.] // Вісн. Донбас. нац. акад. буд-ва та архіт. – Донецьк, 2009. – № 1. – С. 123–131.
5. Нетеса, Н. И. Легкие бетоны на основе граншлака завода имени Петровского / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 35. – С. 156–161.
6. Нетеса, Н. И. Легкие бетоны с золой уноса Приднепровской ТЭС / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук, А. Н. Нетеса // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 5 (47). – С. 137–145. doi: 10.15802/stp2013/17978.
7. Нетеса, Н. И. Снижение пустотности бетонных смесей подбором рационального зернового состава компонентов / Н. И. Нетеса // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 15. – С. 200–204.
8. Обработка данных средствами Excel при планировании эксперимента : учеб. пособие для вузов / Н. М. Ершова, В. Н. Деревянко, Р. А. Тимченко, О. В. Шаповалова. – Днепропетровск : ПГАСА, 2012. – 350 с.
9. Пушкарьова, К. К. Особливості технології отримання лужного шлако-портландцементу та бетонів на його основі / К. К. Пушкарьова, О. А. Гончар, О. П. Бондаренко // Вісн. Донбас. нац. акад. буд-ва та архіт. – Донецьк, 2009. – № 1. – С. 82–88.
10. Усовершенствование технологии приготовления механоактивированных мелкозернистых бетонных смесей из доменных гранулированных шлаков / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, О. С. Щербак [и др.] // Стр-во, материаловедение, машиностроение. Серия : Стародубовские чтения / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архит. – Днепропетровск, 2013. – Вип. 67. – С. 224–228.
11. Федьнин, Н. И. Высокопрочный мелкозернистый шлакобетон / Н. И. Федьнин, М. И. Диамант. – Москва : Стройиздат, 1975. – 176 с.
12. Энерго- и ресурсосбережение при использовании техногенных материалов в технологии цемента / В. К. Классен, И. А. Шилова, Е. В. Текучева, В. В. Степанов // Строительные материалы. – 2007. – № 8. – С. 18–19.

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

13. Li, C. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements / C. Li, H. Sun, L. Li // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – Vol. 40. – Iss. 9. – P. 1341–1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
14. Maaitah, O. Utilization of natural and industrial mineral admixtures as cement substitutes for concrete production in Jordan / O. N. Maaitah, N. A. A. Hadi, M. Abdelhadi // *J. of Civil Engineering and Construction Technology*. – 2015. – Vol. 6 (4). – P. 51–58.
15. Mudersbach, D. Feingranulierter Hüttensand für die Zementherstellung / D. Mudersbach, M. Kühn, J. Geiseler // *Report des FehS-Instituts*. – 2001. – № 1. – P. 4–5.
16. Živica, V. Effectiveness of new silica fume alkali activator / V. Živica // *Cement and Concrete Composites*. – 2006. – Vol. 28. – Iss. 1. – P. 21–25. doi: 10.1016/j.cemcomcomp.2005.07.004.

В. І. БОЛЬШАКОВ<sup>1</sup>, М. О. ЄЛИСЕЄВА<sup>2\*</sup>, С. А. ЩЕРБАК<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Матеріалознавство та обробка матеріалів», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (056) 745 23 72, ел. пошта bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup>Каф. «Реконструкція та управління в будівництві», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (096) 377 01 36, ел. пошта SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

<sup>3</sup>Каф. «Технологія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (095) 243 32 09, ел. пошта aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

## ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ФАКТОРАМИ ТА ОСНОВНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ МЕХАНОАКТИВОВАНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ

**Мета.** В статті необхідно провести встановлення закономірностей впливу складу дрібнозернистих бетонів, одержуваних на основі доменних гранульованих шлаків, та тривалості обробки бетонної суміші в змішувачі-активаторі на основні властивості матеріалу. **Методика.** Для досягнення поставленої мети в роботі використаний повнофакторний експеримент типу 2<sup>2</sup>. В якості перемінних були прийняті: співвідношення між цементом і доменним гранульованим шлаком ( $X_1$ ) та тривалість обробки бетонної суміші в змішувачі-активаторі ( $X_2$ ). Вихідними факторами, тобто контрольованими властивостями, були: рання міцність в 7-добовому віці ( $Y_1=f_7$  діб), стандартна міцність в 28-добовому віці ( $Y_2=f_{28}$  діб) та середня щільність бетону ( $Y_3=\rho$ ), який тверднув у нормальних умовах. **Результати.** Аналіз отриманих моделей регресії свідчить про те, що зі зменшенням вмісту заповнювача в складі бетону й підвищенням тривалості обробки суміші в змішувачі-активаторі, міцність у різний термін твердіння та щільність бетону зростають. При цьому більший вплив на властивості бетону має зміння складу суміші. Так, при однаковому терміні обробки суміші 1:4 та 1:5; на 13 % – між складом 1:5 та 1:6. Та ж закономірність простежується і для ранньої міцності бетону. Щільність бетону мало змінюється, її крива розташована практично в одній площині. Так, при рівній тривалості обробки суміші розходження значень щільності для складу 1:3 та 1:9 становить 7,6 %. Збільшення часу обробки суміші на 6 с на всьому досліджуваному діапазоні дає приріст міцності в 28-добовому віці приблизно на 7–8 % для всіх складів. Значення ранньої міцності змінюється на 12–14 % між сумішшю, обробленою за 30 та 36 с. Потім при кожному наступному збільшенні тривалості обробки на 6 с це розходження знижується на 1 % для всіх складів. Зміна щільності бетону при варіюванні терміну обробки суміші фактично не змінюється та становить 1–2 % при інтервалі в 6 с на всьому досліджуваному діапазоні для всіх складів. **Наукова новизна.** Вперше визначені рівняння регресії, що пов'язують тривалість активації дрібнозернистої бетонної суміші та її склад із основними властивостями бетону. **Практична значимість.** Отримано рівняння регресії та графічні поверхні, за якими можливо визначити показники технологічних факторів, які забезпечують одержання заданої ранньої, стандартної міцності та середньої щільності механоактивованого дрібнозернистого бетону.

**Ключові слова:** механоактивовані дрібнозернисті бетони; доменні гранульовані шлаки; технологічні фактори; рання міцність бетону; стандартна міцність бетону; середня щільність бетону

V. I. BOLSHAKOV<sup>1</sup>, M. O. YELISIEIEVA<sup>2\*</sup>, S. A. SHCHERBAK<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dep. «Materials Science», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskiy St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. + 38 (056) 745 23 72, e-mail bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

<sup>2\*</sup>Dep. «Reconstruction and Management in Construction», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskiy St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (096) 377 01 36, e-mail SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

<sup>3</sup>Dep. «Building Materials, Products and Structures Technology», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskiy St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (095) 243 32 09, e-mail aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

## CORRELATION BETWEEN TECHNOLOGICAL FACTORS AND BASIC PROPERTIES OF MECHANICALLY ACTIVATED FINE CONCRETES

**Purpose.** The article highlights research of the influence of fine concrete composition based on blast-furnace slag on general material properties. Time of the concrete treatment in the mixer activator is included to the influence research. **Methodology.** There was realized full factor experiment of 2<sup>2</sup> type with following variables: cement versus blast-furnace granulated slag ratio ( $X_1$ ) and time of the treatment in the mixer-activator ( $X_2$ ). Controlled properties are: early concrete strength ( $Y_1=f_7$  day), normal concrete strength ( $Y_2=f_{28}$  day) and average density of the concrete ( $Y_3=\rho$ ), hardened in normal conditions. **Findings.** Regress model analysis showed that decrease of the aggregate volume in concrete and increase of the mixing time grows up the strength and density of concrete. Different composition of the concrete also significantly affects concrete properties. Thus, for the same treatment time normal concrete strength at 28-day-old reduces by about 30% for compositions proportions 1:3 and 1:4, by 22% between a 1:4 and 1:5 and by 13% for 1:5 and 1:6 cases. The same behavior is obtained for early concrete strength. Density of concrete is not influenced and influence curve is almost flat. The difference between density values for different composition proportions 1:3 and 1:9 is 7.6% at equal mixture time. The increment of mixture processing time of 6 s increase normal concrete strength at 28-day-old about 7-8 % for all compositions in the studied range. Early strength values differ by 12-14 % between treatment time 30 and 36 seconds respectively. Every next six second increase step in treatment time reduce this difference by 1% for every mix compositions. There is practically no change of concrete density during the mixture time varying. Total change is 1-2% for 6 s in the entire research range for all compositions. **Originality.** For the first time the regression equations were determined, linking the duration of the activation of fine-grained concrete mix and its composition with the basic properties of concrete. **Practical value.** Regression equations and graphical surface can provide required concrete composition for the established early and normal concrete strength as well as concrete density.

**Keywords:** mechanically activated fine concretes; granulated blast-furnace slags; technological factors; early concrete strength; normal concrete strength; the average density of the concrete

### REFERENCES

1. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betonov* [Concretes technology]. Moscow, ASV Publ., 2002. 500 p.
2. Bolshakov V.I., Yelisieieva M.A., Shcherbak S.A. Vliyaniye vysokoskorostnoy obrabotki domennykh granulirovannykh shlakov na ikh svoystva [Influence of high-speed processing of blast-furnace granulated slag on its properties]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture], 2013, issue 8, pp. 4-9.
3. Voznesenskiy V.A., Lyashenko T.V., Ogarkov B.L. *Chislennyye metody resheniya stroitelno-tekhnologicheskikh zadach na EVM* [Numerical methods for the construction and technological problems on a computer]. Kyiv, Vyshcha Shkola Publ., 1989. 328 p.
4. Kryvenko P.V., Petropavlovskiy O.M., Helevera O.H., Vozniuk H.V., Pushkar V.I., Hots V.I., Tymoshenko S.A. Luzhno-aktyvovani shlakoportlandtsementy [Alkali-activated slag portland cements]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, issue 1, pp. 123-131.
5. Netesa N.I., Palanchuk D.V. Legkiyye betony na osnove granshlaka zavoda imeni Petrovskogo [Lightweight concretes on the basis of granulated slag from the iron and steel plant named after Petrovskiy]. *Visnyk Dni-*

## ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- propetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 33, pp. 156-161.
6. Netesa N.I., Palanchuk D.V., Netesa A.N. Legkiyye betony s zoloy unosa Pridneprovskoy TES [Lightweight concretes with fly-ash of Prydniprovsk thermal power station]. *Nauka ta prohres transport – Science and Transport Progress*, 2013, issue 5, pp. 137-145. doi: 10.15802/stp2013/17978.
  7. Netesa N.I. Snizheniye pustotnosti betonnykh smesey podborom ratsionalnogo zernovogo sostava komponentov [Reduction of concrete voidness mixes of rational selection of the grain components]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 15, pp. 200-204.
  8. Yershova N.M., Derevyanko V.N., Timchenko R.A., Shapovalova O.V. *Obrabotka dannykh sredstvami Exsel pri planirovani eksperimenta* [Data processing means Exsel when planning experiments]. Dnepropetrovsk, PSACEA Publ., 2012. 350 p.
  9. Pushkarova K.K., Honchar O.A., Bondarenko O.P. Osoblyvosti tekhnologii otrymannia luzhnoho shlakoportlandtsementu ta betoniv na yikh osnovi [Technology features of alkali slag portland cement and concretes on its basis]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnystva ta arkhitektury* [Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, issue 1, pp. 82-88.
  10. Bolshakov V.I., Yeliseyeva M.A., Shcherbak O.S., Shcherbak S.A., Yakovenko D.D. Uovershenstvovaniye tekhnologii prigotovleniya mekhanoaktivirovannykh melkozernistykh betonnykh smesey iz domennykh granulirovannykh shlakov [Improving the technology of preparation mechanically activated fine concrete mixtures of granulated blast-furnace slags]. *Stroitelstvo, materilovedeniye, mashynostroyeniye* [Construction, Materials, Mechanical Engineering], 2013, issue 67, pp. 224-228.
  11. Fedynin N.I., Diamant M.I. *Vysokoprochnyy melkozernisty shlakobeton* [High-strength fine slag concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 176 p.
  12. Klassen V.K., Shilova I.A., Tekucheva Ye.V., Stepanov V.V. Energo- i resursosberezheniye pri ispolzovanii tekhnogennykh materialov v tekhnologii tsementa [Energy-saving by using man-made materials in cement technology]. *Stroitelnyye materialy – Building Materials*, 2007, no. 8, pp. 18-19.
  13. Li Chao, Sun Henghu, Li Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and meta-kaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, pp. 1341–1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
  14. Maaitah O.V., Hadi N.A.A., Abdelhadi M. Utilization of natural and industrial mineral admixtures as cement substitutes for concrete production in Jordan. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 2015, vol. 6(4), pp. 51–58.
  15. Mudersbach D., Kühn M., Geiseler J. Feingranulierter Hüttensand für die Zementherstellung. *Report des FehS-Instituts*, 2001, no. 1, pp. 4 – 5.
  16. Živica V. Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, 2006, vol. 28, no. 1, pp. 21–25. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.07.004.

*Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Н. И. Нетесой (Украина); д.т.н., проф. Н. В. Шпирько (Украина)*

Поступила в редколлегию: 06.08.2015

Принята к печати: 05.01.2016