

**БАЛЫКОВ А. С., НИЗИНА Т. А., КОРОВКИН Д. И.,**

**ВОЛОДИН В. В., КАРАБАНОВ М. О.**

**МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ  
ИЗ ВЫСОКОНАПОЛНЕННЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ СМЕСЕЙ,  
СОДЕРЖАЩИХ МЕЛКИЙ ПРИРОДНЫЙ КВАРЦЕВЫЙ ПЕСОК<sup>1</sup>**

**Аннотация.** Приведены результаты исследования водопотребности мелких природных кварцевых песков и физико-механических свойств самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов с применением карбонатного наполнителя-микрокальцита. Разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов классов прочности на сжатие В20÷В90 из самоуплотняющихся смесей класса удобоукладываемости SF1.

**Ключевые слова:** мелкозернистый бетон, высоконаполненная самоуплотняющаяся смесь, карбонатный наполнитель, мелкий песок, распыл, прочностные показатели.

**BALYKOV A. S., NIZINA T. A., KOROVKIN D. I.,**

**VOLODIN V. V., KARABANOV M. O.**

**MODIFIED FINE-GRAINED CONCRETES  
FROM HIGH-FILLED SELF-COMPACTING MIXTURES  
CONTAINING FINE NATURAL QUARTZ SAND**

**Abstract.** The results of the study of water demand of fine natural quartz sands and physical and mechanical properties of self-compacting fine-grained concretes with the use of carbonate filler-microcalcite are given. The compositions of modified fine-grained concretes of compressive strength class C20÷C90 from self-compacting mixtures of workability class SF1 are developed.

**Keywords:** fine-grained concrete, high-filled self-compacting mixture, carbonate filler, fine sand, blurry, strength indicators.

В настоящее время одним из приоритетных стратегических направлений строительного материаловедения является разработка энергоэффективных модифицированных цементных бетонов, отличающихся комплексом высоких физико-технических характеристик [1–5]. Общей особенностью современных модифицированных

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-29-12036 «Разработка принципов управления фазовым составом и минерало-морфологическим состоянием структуры модифицированного цементного камня для повышения сопротивления высокопрочных мелкозернистых и легких бетонов и фибробетонов климатическим и эксплуатационным воздействиям».

цементных композитов является высокая прочность (от 60÷100 МПа и выше), причем прочностные показатели возрастают с уменьшением содержания и размеров заполнителя, достигая максимальных значений при формировании высокопрочной тонкозернистой структуры, отличающейся высокой однородностью и отсутствием опасности разрушения по зоне контакта «крупный заполнитель – цементный камень» [6]. Эффективность мелкозернистой структуры при создании высокопрочных цементных бетонов подтверждена результатами авторских исследований [7–10].

В развитии технологии высокопрочных тяжелых и мелкозернистых бетонов решающую роль сыграли сформированные в результате многочисленных исследований и подтвержденные практикой научные основы модифицирования цементных систем химическими и активными минеральными добавками [11–16]. Применение эффективных индивидуальных добавок (суперпластификаторов на поликарбоксилатной и полигликолиевой основах, активных пуццолановых добавок – микрокремнеземов, дегидратированных каолинов и высокодисперсных зол, расширяющих добавок, реологически активных наполнителей из плотных горных пород и др.) и их комплексов стало ключом к решению многих технологических задач бетоноведения, в том числе – получению модифицированных цементных композитов повышенной прочности из самоуплотняющихся смесей [6, 17–19].

К самоуплотняющимся относят бетонные смеси с высокими показателями удобоукладываемости: расплыв стандартного конуса свыше 55-60 см при сниженных значениях водоцементного отношения до 0,35-0,4 и менее. Отличительной особенностью рецептуры самоуплотняющихся тяжелых или мелкозернистых бетонов с крупными песками является повышенное содержание реологически активной суспензионной составляющей, количество которой в различных бетонах колеблется от 40 до 50% [17–19]. Увеличение доли водно-дисперсной суспензии достигается введением тонкодисперсных порошков из горных пород осадочного, вулканического и метаморфического происхождения в количестве до 100÷150% от массы цемента, которые совместимы с известными пластификаторами и являются реологически активными в смеси с цементом [20] (известняк, мрамор, доломит, молотый кварцевый песок и др.). Однако вопросы получения самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей с применением распространенных мелких природных кварцевых песков с модулем крупности менее 2,0 малоизучены, особенно в малоцементных смесях с расходом вяжущего до 400 кг/м<sup>3</sup>, самоуплотнения которых невозможно достигнуть при минимуме воды и без расслоения при указанных степенях наполнения цементных систем вследствие высокой межзерновой пустотности и водопотребности указанных мелких

заполнителей, а также низкой эффективности пластификаторов в подобных смесях вне зависимости от их дозировки [21].

В данной работе приведены результаты исследования водопотребности мелких природных кварцевых песков, а также проанализирована возможность получения на их основе составов самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей класса по удобоукладываемости SF1.

Водопотребность мелких природных кварцевых песков определялась по методике Б.Г. Скрамтаева и Ю.М. Баженова [22], основанной на подборе смесей одинаковой подвижности при сравнительных испытаниях цементного теста и растворной смеси с мелким заполнителем. Для определения водопотребности песка ( $V_{п}$ ) на начальном этапе устанавливалось водосодержание цементного теста ( $(B/C)_{ц}$ ), при котором оно имеет расплыв конуса на встряхивающем столике (ГОСТ 310.4) около 170 мм, что приблизительно соответствует его нормальной густоте (ГОСТ 310.3). Затем определялось водоцементное отношение растворной смеси состава  $C/P=1/2$  на исследуемом песке ( $(B/C)_{р}$ ), при котором она имеет тот же расплыв конуса на встряхивающем столике (170 мм). Водопотребность песка (%) вычислялась по формуле:

$$V_{п} = \frac{(B/C)_{р} - (B/C)_{ц}}{2} \cdot 100\%. \quad (1)$$

В качестве вяжущего для приготовления растворной смеси использовался портландцемент класса ЦЕМ I 32,5Б с показателями нормальной густоты цементного теста  $НГ = 26,5\%$  и, соответственно, водоцементного отношения  $(B/C)_{ц} = 0,265$ ; в качестве мелкого заполнителя – природный кварцевый песок Новостепановского карьера Ичалковского района Республики Мордовия с модулем крупности  $M_{кр} = 1,6$  и содержанием пылеватых и глинистых частиц 1,6%. В результате фракционирования песка и отбора фракций менее 0,63 мм модуль крупности изменялся в диапазоне  $M_{кр} = 1,4 \div 1,6$ . Данный вид мелкого заполнителя использовался в двух модификациях: в виде отобранной фракции менее 0,63 мм с  $M_{кр} = 1,4$  и средним размером зерна  $d_{ср} = 0,23$  мм (П1); в естественном сложении с размером зерна не более 5 мм,  $d_{ср} = 0,29$  мм и  $M_{кр} = 1,6$  (П2).

Результаты определения водопотребности исследуемых видов песка приведены в таблице 1. Как видно из представленных данных, природный кварцевый песок Новостепановского карьера имеет водопотребность в диапазоне  $V_{п} = 7,4 \div 8,3\%$  с повышением данного показателя при увеличении средней дисперсности и уменьшении модуля крупности песка при его фракционировании.

### Результаты исследования водопотребности мелких природных кварцевых песков

Вид применяемого песка	Маркировка песка	Дисперсность и модуль крупности песка	$(В/Ц)_p$ , отн. ед.	$V_p$ , %
природный кварцевый песок Новостепановского карьера	П1	фракция менее 0,63 мм, $d_{cp} = 0,23$ мм и $M_{кр} = 1,4$	0,430	8,3
	П2	естественное сложение с размером зерна не более 5 мм, $d_{cp} = 0,29$ мм и $M_{кр} = 1,6$	0,413	7,4

На следующем этапе осуществлялся подбор составов самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей с применением карбонатного наполнителя – микрокальцита КМ100 (МКМ) компании ООО «Полипарк». Для повышения содержания тонкодисперсных компонентов и объемной концентрации вяжущего помимо микрокальцита использовались три вида минеральных добавок – микрокремнезем конденсированный неуплотненный МК-85 (МК) производства АО «Кузнецкие ферросплавы»; высокоактивный метакаолин белый (ВМК) производства ООО «Мета-Д»; добавка «Пенетрон Адмикс» (Адмикс) производства ООО «Завод гидроизоляционных материалов «Пенетрон». В качестве пластифицирующей добавки применялся поликарбоксилатный суперпластификатор Melflux 5581 F (СП) производства BASF Construction Solutions (Troostberg, Германия).

По результатам исследования разработаны составы самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей класса по удобоукладываемости SF1 (диаметр расплыва из конуса Хегерманна не менее 260÷280 мм, осадка и расплыв стандартного конуса Абрамса более 25÷25,5 см и 500÷550 мм соответственно) с мелким природным песком П1 (табл. 1), расходами портландцемента ЦЕМ I 32,5Б (Ц) в диапазоне от 239 до 739 кг/м<sup>3</sup> бетонной смеси, долей МКМ – 45÷321% от массы портландцемента, содержанием СП Melflux 5581 F и воды – соответственно 0,7% и 0,202÷0,218 отн. ед. от массы смеси «Ц + МКМ». Данные самоуплотняющиеся смеси являются высоконаполненными системами, отличаются повышенным содержанием тонкодисперсных реологически активных компонентов (Ц + МКМ) и реологически активной суспензионной составляющей (Ц + МКМ + минеральная добавка + вода) – 340÷360 и 580÷600 л/м<sup>3</sup> соответственно, обеспечивающим достаточную прослойку между частицами мелкого песка.

По результатам экспериментальных исследований (табл. 2) зафиксированы повышенные значения плотности модифицированных мелкозернистых бетонов из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей с песком П1 – 2320÷2393 кг/м<sup>3</sup> в нормальных влажностных условиях. При этом прочностные показатели в возрасте 28 суток

исследуемых цементных композитов изменяются в широком диапазоне: соответственно при изгибе – 5,3÷14,9 МПа; при сжатии – 28,3÷115,8 МПа.

Исследуемые составы модифицированных мелкозернистых бетонов из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей отличаются высокими темпами набора прочности: предел прочности при изгибе в возрасте 1 и 7 суток соответственно составил 28÷66 и 75÷86%, а при сжатии – 28÷44 и 71÷81% от прочности в возрасте 28 суток. По результатам анализа данных таблицы 2 установлена возможность получения высокопрочных мелкозернистых бетонов без активных минеральных добавок при расходе портландцемента 739 кг/м<sup>3</sup>: состав №1 с пределом прочности при сжатии и изгибе в возрасте 28 суток – 92,5 и 12,3 МПа соответственно.

Таблица 2

**Составы и физико-механические свойства модифицированных мелкозернистых бетонов из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей с мелким песком III**

Составы Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
<b>Рецептурно-технологические показатели</b>							
МКМ / Ц, отн. ед.	0,45	0,45	0,45	0,45	1,11	1,63	3,21
Ц, кг/м <sup>3</sup>	701÷739				239÷485		
П / Ц, отн. ед.	1,50	1,50	1,50	1,50	2,23	2,92	4,68
Добавка (Д), % от массы (Ц + Д)	-	10 (ВМК)	10 (Адмикс)	10 (МК)	10 (ВМК)	-	-
СП, % от массы (Ц + МКМ)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
В / Ц, отн. ед.	0,29	0,30	0,32	0,32	0,44	0,57	0,89
Расплав из конуса Хегерманна, мм	295	260	280	280	260	290	300
<b>Физико-механические свойства в возрасте 28 суток</b>							
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2393	2343	2320	2367	2320	2323	2344
Прочность при изгибе, МПа	12,3	12,8	10,6	14,9	9,9	7,4	5,3
Прочность при сжатии, МПа	92,5	104,2	82,7	115,8	73,8	47,5	28,3

По результатам исследования физико-механических свойств модифицированных мелкозернистых бетонов из самоуплотняющихся смесей с повышенным расходом портландцемента (701÷739 кг/м<sup>3</sup>) зафиксировано, что введение в рецептуру активных минеральных добавок микрокремнезема и метакаолина приводит к приросту прочностных показателей композитов. В частности, исследуемые прочностные характеристики мелкозернистых бетонов с МК и ВМК составов №2 и 4 выше аналогичных показателей немодифицированных активными минеральными добавками композитов контрольного состава №1 при близких расходах портландцемента: до 21 и 25% при изгибе и сжатии соответственно.

Введение в рецептуру добавки Адмикс (состав №3) способствует некоторому снижению прочностных показателей мелкозернистых бетонов в проектном возрасте (28 суток) по сравнению с композитами контрольного состава №1 при близких расходах портландцемента – на 14 и 11% при изгибе и сжатии соответственно. Данный эффект можно объяснить несколько повышенной водопотребностью мелкозернистых бетонных смесей с данной минеральной добавкой (табл. 2) и особенностью структуры полученных на их основе композитов (пористостью, фазовым составом цементного камня).

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов классов прочности на сжатие В20÷В90 из высоконаполненных самоуплотняющихся смесей с расходом портландцемента 239÷739 кг/м<sup>3</sup> и водосодержанием 212÷226 л/м<sup>3</sup>, в том числе высокопрочных класса В55 и выше с расходом портландцемента 485÷739 кг/м<sup>3</sup>, включающие карбонатный наполнитель, СП Melflux 5581 F, минеральные добавки МК, ВМК-б и Адмикс (при необходимости), мелкий природный кварцевый песок с модулем крупности 1,4, со следующими показателями качества: плотность в нормальных влажностных условиях в возрасте 28 суток – 2320÷2393 кг/м<sup>3</sup>; прочность при изгибе и сжатии в возрасте 28 суток – 5,3÷14,9 и 28,3÷115,8 МПа соответственно. Использование подобных самоуплотняющихся смесей в практике реального строительства будет способствовать внедрению ресурсосберегающих, энергосберегающих и более экологически чистых технологий за счет сокращения наращивания материало- и энергоемкого производства портландцемента, снижения выбросов вредных газов в атмосферу, уменьшения расхода энергии и топлива на укладку и формование бетонных смесей, снижения объемов авто- и железнодорожных перемещения сырья и замены дорогостоящих привозных заполнителей дешевыми местными песками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
2. Калашников В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов // Строительные материалы. – 2016. – № 1-2. – С. 96-103.
3. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С. Новые модифицированные бетоны. – М.: Навруз, 2010. – 258 с.
4. Aitcin P.C. High-performance concrete. – London: T&F e-Library, 2004. – 591 p.

5. Nawy E.G. Fundamentals of high-performance concrete. – New-York: J. Wiley and Sons, 2001. – 441 p.
6. Фаликман В.Р. Новые эффективные высокофункциональные бетоны // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – №2. – С. 78-84.
7. Nizina T.A., Balykov A.S. Experimental-statistical models of properties of modified fiber-reinforced fine-grained concretes // Magazine of Civil Engineering. – 2016. – No. 2. – Pp. 13-25. DOI: 10.5862/MCE.62.2.
8. Nizina T.A., Ponomarev A.N., Balykov A.S., Pankin N.A. Fine-grained fibre concretes modified by complexed nanoadditives // International Journal of Nanotechnology. – 2017. – Vol. 14. – Nos. 7/8. – Pp. 665-679.
9. Nizina T.A., Selyaev V.P., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Optimization of compositions of multicomponent fine-grained fiber concretes modified on different scale levels // Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. – 2017. – Vol. 9. – No. 2. – Pp. 43-65.
10. Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I. Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – No. 4. – Pp. 73–83. DOI: 10.18720/MCE.72.9.
11. Ушеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // Строительные материалы. – 2006. – №10. – С. 8-12.
12. Фаликман В.Р. Поликарбоксилатные гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 2 (28). – С. 86-90.
13. Селяев В.П., Низина Т.А., Балбалин А.В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 31 (50), Ч. 2. – С. 156-163.
14. Кирсанова А.А., Крамар Л.Я. Органоминеральные модификаторы на основе метакеолина для цементных бетонов // Строительные материалы. – 2013. – №10. – С. 54-56.
15. Калашников В.И., Москвин Р.Н., Белякова Е.А., Белякова В.С., Петухов А.В. Высокодисперсные наполнители для порошково-активированных бетонов нового поколения // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – №2 (22). – С. 113-118.
16. Тараканов О.В., Калашников В.И. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения // Известия КГАСУ. – 2017. – №1 (39). – С. 223-229.

17. Okamura H., Ouchi M. Self-compacting concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2003. – Vol. 1. – No. 1. – Pp. 5-15.
18. De Schutter G., Bartos P., Domone P., Gibbs J. Self-compacting concrete. – New-York: Taylor & Francis Group, 2008. – 296 p.
19. EFNARC. The European guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use. – UK: Farnham, 2005. – 68 p.
20. Калашников В.И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. – 2008. – №10. – С. 4-6.
21. Балыков А.С. Модифицированные мелкозернистые бетоны и фибробетоны на основе высоконаполненных самоуплотняющихся смесей: дисс. ... канд. тех. наук. – Казань, 2018. – 228 с.
22. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: АСВ, 2003. – 500 с.