

Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства

*К.т.н., доцент С.В. Ключев**

ФГБОУ ВПО Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

Ключевые слова: мелкозернистый бетон; техногенный песок; фибробетон

Для строительства объектов чемпионата мира по футболу 2018 года необходимо в ближайшие годы удвоить производство высококачественных строительных конструкций, таких как балки, плиты, ригели и др. Более того, в настоящее время происходит интенсивное строительство крупных объектов, что приводит к необходимости использования бетонов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, такими как прочность на сжатие и растяжение, износостойкость, коррозионная стойкость, трещиностойкость, морозостойкость и т. д. Для разрешения данной проблемы были разработаны составы мелкозернистого сталефибробетона на основе техногенного песка (отсева дробления кварцитопесчаника, обогащенного таволжанским песком), композиционных вяжущих, микродисперсной добавки и гиперпластификатора GLENIUM 115.

Исследования, посвященные дисперсно-армированному бетону, были выполнены Российским инженером В.П. Некрасовым в начале XX в. В России основу знаний о сталефибробетоне сформировали Ю.М. Баженов, И.В. Волков, В.П. Вылекжанин, Л.Г. Курбатов, И.А. Лобанов, А.П. Павлов, Ю.В. Пухаренко, Ф.Н. Рабинович, В.П. Романов, К.В. Талантова, Г.К. Хайдуков, О.Н. Хегай и др. [1-5].

В развитие науки о сталефибробетоне большой вклад внесли ученые Австрии, Австралии, Бельгии, Германии, Голландии, Испании, Канады, Китая, Польши, США, Франции, Чехии, Швейцарии, ЮАР, Японии и других стран. Из них необходимо отметить J.P. Romualdi, B. Gordon, G.B. Batson, M. Jeffrey, I.A. Mandel, I.L. Carson, W.F. Chen, D.I. Hannant, B. Kelly, P.S. Mangat, A.E. Naaman, R.N. Swamy, D. Colin Johnston, D.R. Lankard, V. Ramakrishnan, G. Ruffert, K. Kordina, W.A. Marsden, J. Vodichka и др. [6-12].

Ценность стальных волокон состоит в том, что они не только придают бетону новые свойства, но и открывают путь принципиально новой технологии изготовления строительных изделий. Армирование производится непосредственно в бетоносмесительных агрегатах, т.е. в бетономешалку загружают цемент, песок, щебень и сами волокна, перемешивают их и получают готовую к применению армированную бетонную смесь, которую заливают в форму. Время изготовления изделий сокращается практически вдвое. В связи со значительным повышением физико-механических свойств снижается материалоемкость элементов конструкций, что приводит к уменьшению веса зданий и сооружений.

Ранее проведенные исследования по изучению возможности использования техногенных песков Курской магнитной аномалии (КМА) касались в основном изучения вещественного состава и строения попутнодобываемых скальных пород КМА, разработки составов и технологии производства цементобетонов на их основе, что позволило перевести породы сланцевой толщи, кварцитопесчаники, пески, попавшие в зону горных работ при добыче железистых кварцитов, из разряда отходов в категорию полезных ископаемых [13,14].

Свойства техногенных песков, бетонных смесей и бетонов на их основе зависят от многих факторов, обусловленных свойствами исходных пород, способами их измельчения и методами обогащения полученного продукта. Наиболее существенное влияние оказывают прочность, структура и состав породы. При сопоставлении свойств природных и техногенных песков выявляются принципиальные различия этих материалов. Природные пески в основном являются кварцевыми, с округлой формой зерен и гладкой поверхностью, а техногенные пески имеют существенные различия по составу и свойствам исходных пород, форме зерен и шероховатости их поверхности (рис. 1.).

Шероховатость заполнителей тесно связана с водопоглощением породы: чем выше шероховатость, тем больше водопоглощение. По смачиваемости поверхности заполнителя можно судить о его активности. Чем активнее поверхность заполнителя, тем толще слой притягиваемой и удерживаемой ею воды. При низком значении Ц/В большая толщина удерживаемой воды должна уменьшать расслоение цементного теста и этим повышать адгезию в растворе или бетоне [13].

Ключев С.В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства

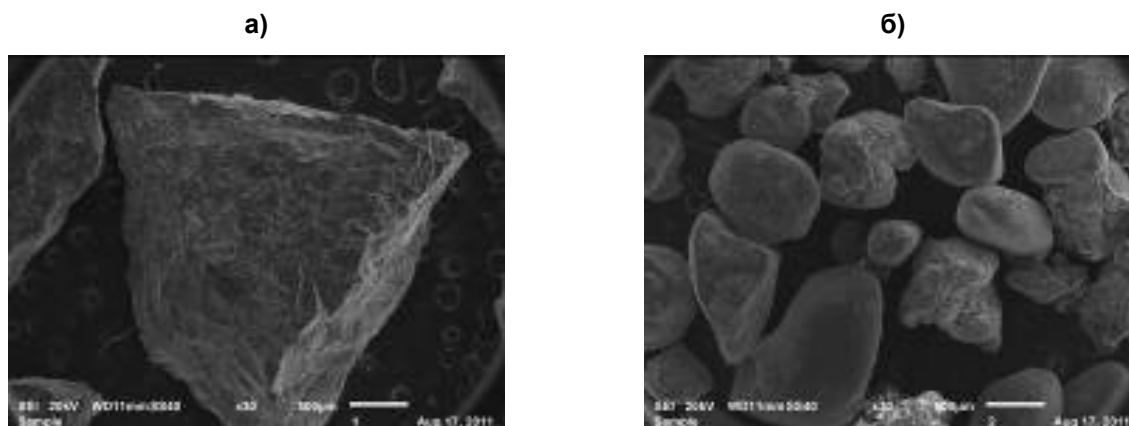


Рисунок 1. Зерно: а) техногенного песка; б) природного песка

При высоком значении Ц/В невозможно образование толстой пленки жидкой фазы на поверхности заполнителя, так как соотношение толщины пленок жидкой фазы вокруг зерен заполнителя и цемента будет определяться соотношением их гидравлической активности. Для цементного теста высокой вязкости (из-за повышенного значения Ц/В) и песка с высокой водоудерживающей способностью может иметь место неполное смачивание поверхности заполнителя и, в результате, частичное прилипание цементного теста к поверхности заполнителя, что значительно снизит величину сцепления между ними.

Основной задачей при производстве мелкозернистых бетонов, в том числе фибробетонов, является снижение расхода клинкерной составляющей, так как из-за отсутствия крупного заполнителя идет перерасход цемента. Наиболее существенными факторами снижения содержания цемента в дисперсно-армированных мелкозернистых бетонах являются уменьшение водопотребности бетонной смеси и повышение активности вяжущего. В связи с этим перспективным направлением повышения эффективности таких бетонов является применение композиционных вяжущих [13,14].

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны вяжущие следующих составов:

- вяжущее тонкомолотый цемент (ТМЦ-100) получали путем домола до удельной поверхности $S_{уд}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$ портландцемента ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2003;
- вяжущее низкой водопотребности (ВНВ-100) получали путем совместного помола до удельной поверхности $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н и пластифицирующей добавки СП-1 в оптимальной дозировке (табл. 1).

Таблица 1. Физико-механические характеристики композиционных вяжущих

Вид вяжущего	Нормальная плотность теста, %	Сроки схватывания, час.		В/Ц	Активность вяжущего, (МПа)	
		начало	конец		при изгибе	при сжатии
ЦЕМ I 42.5Н	26,2	2-40	4-40	0,4	7,2	48,9
ТМЦ-100	25,3	2-20	4-30	0,35	10,2	61,3
ВНВ-100	22,8	2-10	4-10	0,28	12,4	80,2

Исследование реологических свойств композиционных вяжущих проводили путем оценки метода совмещения полных реологических кривых, исследуемых в стационарном ламинарном потоке.

При сопоставлении зернового состава ТМЦ-100 и ВНВ-100 можно сделать вывод, что при одинаковой удельной поверхности вяжущих в ВНВ-100 зерен крупностью от 5 до 20 мкм, чем в ТМЦ-100, соответственно, доля частиц размером менее 5 мкм в ТМЦ-100 несколько выше, чем в ВНВ-100. Зерновой состав получаемого при этом вяжущего ВНВ-100 отличается более высоким содержанием частиц крупностью от 5 до 20 мкм, что обеспечивает его более высокую активность.

По полученным данным можно оценить и эффективность помола: помол цемента с пластифицирующей добавкой СП-1 в количестве 0,6% от массы цемента проходит интенсивнее; так, требуемая величина удельной поверхности $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ достигается через 2 ч. помола, а не через 3 ч., как в случае помола цемента без добавки, что объясняется расклинивающим действием самой добавки (рис. 2).

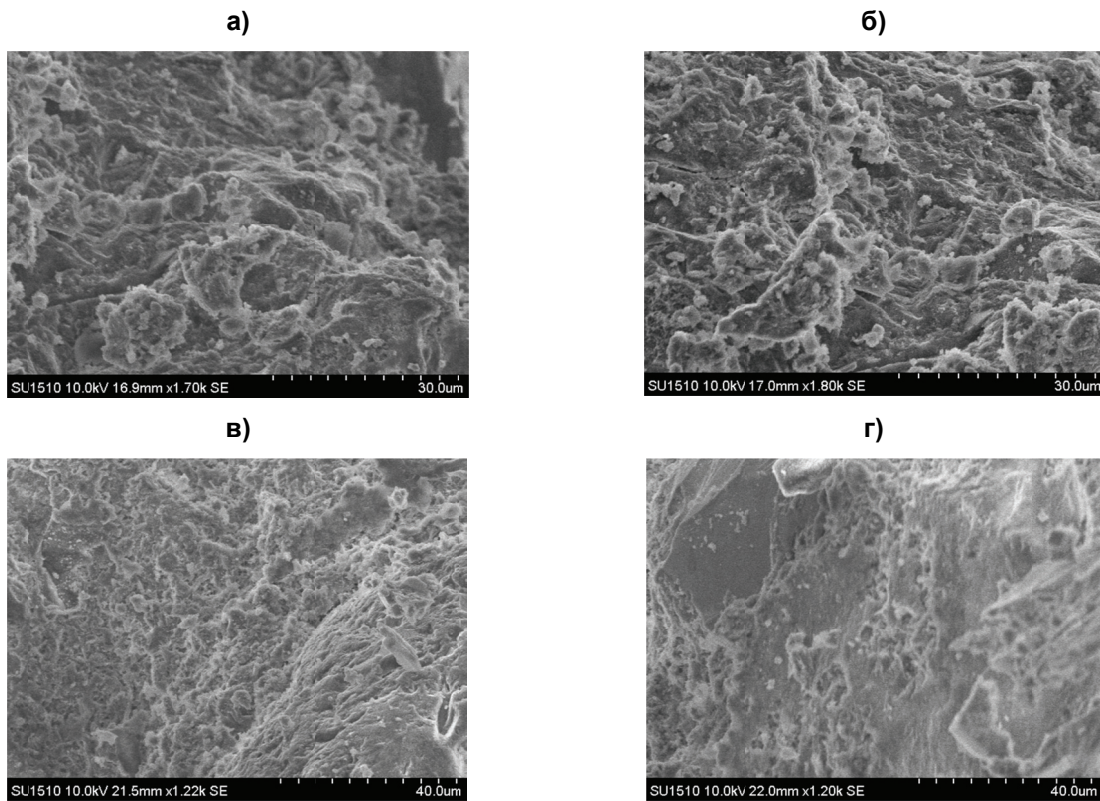


Рисунок 2. Микроструктура в зависимости от свойств вяжущих: а), б) морфология новообразований цементного камня ЦЕМ I 42,5Н; в), г) морфология новообразований цементного камня ВНВ-100. Увеличение: а), в) – $\times 16000$; б), г) – $\times 32000$

Микродисперсную добавку получали путем помола до удельной поверхности $S_{уд}=700 \text{ м}^2/\text{кг}$ используемого отсева дробления кварцитопесчаника. С целью изучения его свойств был проведен рентгенофазовый анализ (рис. 3).

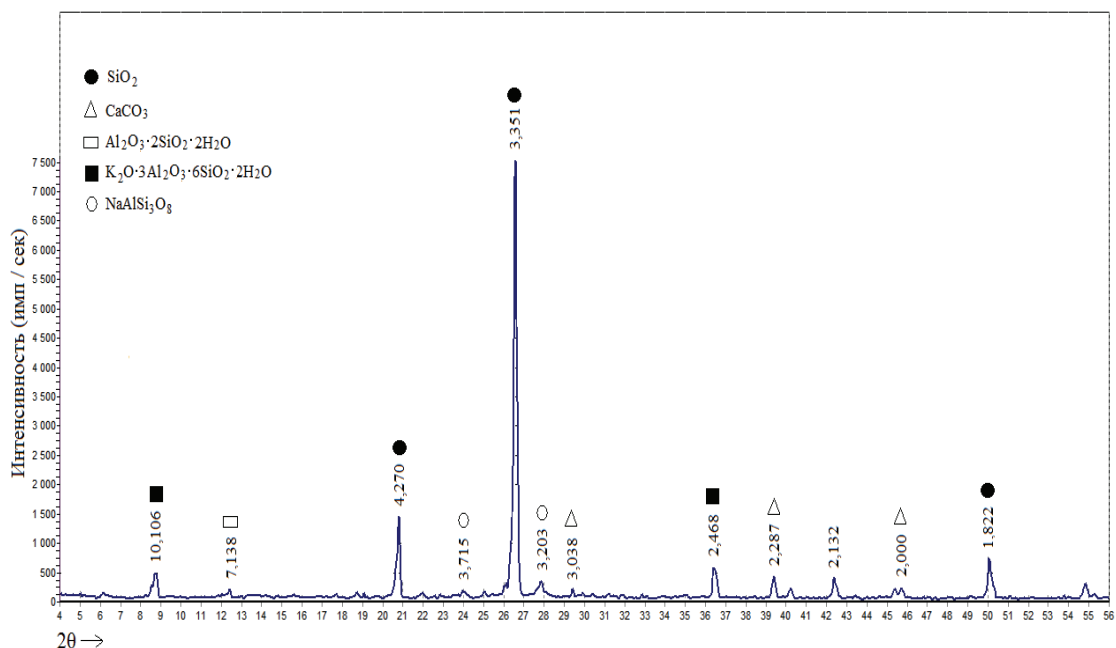


Рисунок 3. Рентгенограмма микронаполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника

Анализ рентгенограммы показал, что микронаполнитель состоит преимущественно из кварца зеленосланцевой степени метаморфизма, спецификой которого является дефектность кристаллической решетки и наличие включений. В процессе техногенных преобразований, при дроблении и помоле частицы кварцитопесчаника частично аморфизуются, превращаясь в активную минеральную добавку [13].

Перспективным направлением повышения эффективности мелкозернистого сталефибробетона является применение композиционных вяжущих и высокоплотной упаковки зерен заполнителя. В данном исследовании был разработан алгоритм и программа расчета составов мелкозернистого сталефибробетона на техногенных песках, обогащенных таволжанским песком, позволяющие получать более плотную упаковку зерен заполнителя (рис. 4).

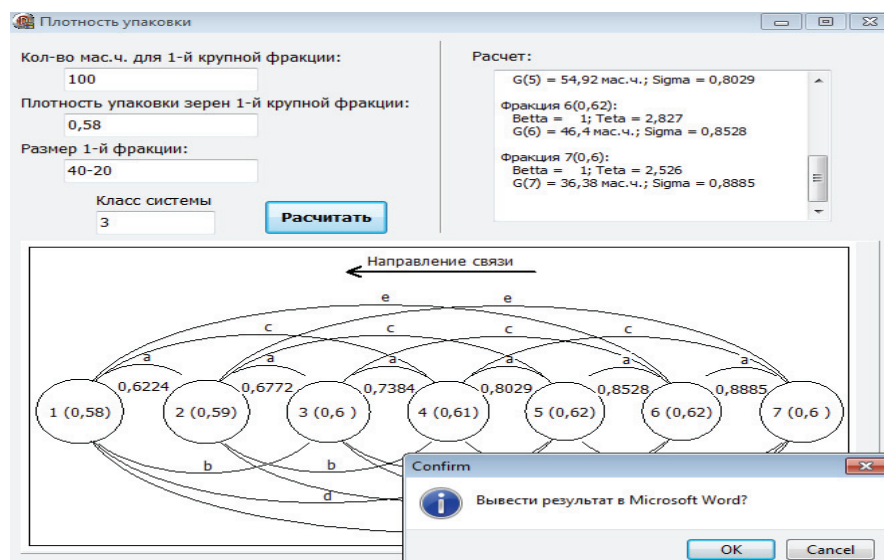


Рисунок 4. Внешний вид программы

Применение микродисперсной добавки (в количестве 7% от массы вяжущего) и дисперсного армирования, а также оптимизация цементного камня (в том числе за счет высокоплотной упаковки зерен заполнителя), использование суперпластификатора – все это позволило получить прочность при сжатии через 28 суток, равную 100,2 МПа (более чем на 60% выше, чем у обычного бетона). Введение микродисперсной добавки способствовало более эффективной и быстрой реакции. Данная добавка уплотнила цементный камень, заполнив пустоты и улучшив сцепление с заполнителем и фиброй. Эффект заполнения пор, создаваемый микрочастицами добавки, способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона.

Ранее проведенные исследования [15-19] позволили установить, что при трехпроцентном армировании по массе удастся получить максимальные физико-механические показатели, что объясняется уплотнением цементного камня между волокнами.

Экспериментальные исследования показали, что дальнейшее увеличение процента дисперсного армирования дает незначительный прирост прочностных, деформативных и эксплуатационных характеристик. Это можно объяснить уменьшением толщины бетонного слоя настолько, что материал проявляет склонность к расслоению. Поэтому для дальнейшего исследования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов принимаем процент армирования 3.

Сталефибробетон с использованием волновой фибры в качестве армирующего материала обладает наилучшими прочностными и деформативными характеристиками [15-19]. Известно, что рост трещиностойкости при дисперсном армировании объясняется процессами «торможения» распространения трещин (разрушение границ раздела между волокном и матрицей; вытягивание волокон из матрицы), действующих последовательно. За счет этого возникает дополнительное сопротивление трещинообразованию и его развитию. В свою очередь, фибре волновой формы будут сложнее вытягиваться из композита, что позволит уменьшить трещинообразование за счет сдерживания образования трещин еще в начальной стадии и лучшего распределения напряжений в самом бетоне.

С целью получения более высокопрочных сталефибробетонов были проведены экспериментальные исследования, результаты которых приведены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические характеристики мелкозернистого бетона, армированного стальной волновой фиброй

Вид вяжущего	Вяжущее, кг	Расход материалов, кг/м ³				Гиперпластификатор GENIUM 115, кг	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа
		Отсев дробления КВП***, кг	Таволжанский песок, кг	Вода, л	Стальная волновая фибра, кг			
Цем I 42,5Н	510	1180	555	170	-		50,2	13,7
Цем I 42,5Н *ВПУ	510	1185	555	172	-		56,5	14,2
Цем I 42,5Н	510	1180	555	172	72		57,4	16,8
Цем I 42,5Н *ВПУ+ **МКН	510	1185	555	174	72	4	72,2	21,1
ТМЦ-100	510	1180	555	160	72		71,4	21,0
ТМЦ-100 *ВПУ+ **МКН	510	1185	555	162	72	4	94,7	22,2
ВНВ-100	510	1180	555	150	72		82,2	21,9
ВНВ-100 *ВПУ+ **МКН	510	1185	555	152	72	4	104,8	23,2

*ВПУ – высокоплотная упаковка зерен мелкозернистого сталефибробетона

**МКД – микронаполнитель

*** КВП – кварцитопесчаник

Таким образом, высокоплотная упаковка компонентов смеси на основе композиционных вяжущих оказывает направленное воздействие на структурообразование сталефибробетона, позволяя повысить прочностные характеристики изгибаемых элементов. Рациональный подбор заполнителя, применение композиционного вяжущего, стальной фибры оптимальной формы и гиперпластификатора дали возможность получить фибробетон с пределом прочности при сжатии 104,8 МПа и пределом прочности на растяжение при изгибе 23,2 МПа.

Состав мелкозернистого фибробетона на композиционном вяжущем имеет более высокие физико-механические, деформативные и эксплуатационные характеристики. Данный факт объясняется лучшей пространственной упаковкой частиц в полученном композите и особенностями структурообразования. Использование композиционного вяжущего и микродисперсной добавки с активной поверхностью ускоряет процесс синтеза новообразований, который заключается в уменьшении периода формирования структуры – за счет связывания гидроксида кальция (образующегося при гидратации алита), и формировании плотной микроструктуры композита. Это подтверждается исследованием рентгенограмм, которые позволили сравнить цементный камень мелкозернистого фибробетона на основе композиционного вяжущего с добавлением микродисперсной добавкой и суперпластификатора GLENIUM115.

**Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, грант № 14.В37.21.1487, тема: «Разработка научных и практических основ создания композиционных вяжущих на основе техногенного сырья с целью производства фибробетона для ремонтных работ», при финансовой поддержке в виде гранта президента Российской Федерации МК-2715.2012.8 по теме: «Разработка научных и практических основ повышения эффективности мелкозернистого фибробетона на основе техногенного песка и композиционного вяжущего для промышленного и гражданского строительства».*

Литература

1. Баженов Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ, 2003. 500 с.
2. Пухаренко Ю. В. Принцип формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. №10. С. 47–50.
3. Рабинович Ф. Н. Дисперсно-армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. 174 с.
4. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологи, конструкции. М.: АСВ, 2004. 560 с.
5. Талантова К. В. Основы создания сталефибробетонных конструкций с заданными свойствами // Бетон и железобетон. 2003. №5. С. 4–8.
6. Brandt A. M. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. London: Spon Press, 2009. 544 p.
7. Fernandes G. R. La influencia de algunas caracteristicas de las aridas finos (arenas) en la propiedades des hormogon de cemento portland // Cemento e Hormigon. 1976. Vol. 47. №506. Pp. 415–428.
8. Herr O. Les materiaux autocompactants essorables de structure (MACES). Etude de faisabilite d'une nouvelle gamme de materiaux hydrauliques pour les assises de chaussees // Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussees. 2001. №232. Pp. 99–103.
9. Beaudoin J. J. Handbook of Fiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and Applications (Building Materials Science). Noyes: William Andrew, 1990. 194 p.
10. Bernhard Maidl. Steel Fibre Reinforced Concrete. Wiley: Ernst & Sohn, 1995. 292 p.
11. Piasta J. Rheological Properties of Concretes with Fine Aggregate// Cement and Concrete Research. 1985. Vol. 15. №2. Pp. 253–260.
12. Steopoe A. Sur la structure des suspensions aqueueses des ciments purs ou mélanges et sur les propriestes techniques de ces suspensions durcies// Revue des Materiaux de constructions. 1981. №508. Pp. 1–9.
13. Лесовик Р. В. Мелкозернистые бетоны на композиционных вяжущих и техногенных песках: дисс. ... д-ра техн. наук. Белгород, 2009. 496 с.
14. Черкашин Ю. Н. Мелкозернистые бетоны для энергетического строительства на обогащенных песках курской магнитной аномалии: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Белгород, 2006. 24 с.
15. Ключев А. В. Отходы горнодобывающих предприятий как сырье для производства мелкозернистого бетона армированного фибрами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №4. С. 81–84.
16. Ключев А. В. Сталефибробетон для сборно-монолитного строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. №2. С. 60–63.
17. Ключев С. В., Лесовик Р. В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна // Бетон и железобетон. 2011. №3. С. 7–9.
18. Ключев С. В., Лесовик Р. В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон стекловолокном // Бетон и железобетон. 2011. №6. С. 4–6.
19. Ключев С. В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. №4. С. 71–74.

**Сергей Васильевич Ключев, Белгород, Россия*

Тел. моб.: +7(951)139-63-27; эл. почта: Klyuyev@yandex.ru

© Ключев С.В., 2012

doi: 10.5862/MCE.34.9

High-strength fiber concrete for industrial and civil construction

S.V. Klyuyev,*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia
+7(951)139-63-27; эл. почта: Klyuyev@yandex.ru*

Key words

fine-grained concrete; anthropogenic sand; fiber concrete

Abstract

The issue of using steelfiber for dispersed reinforce of fine-grained concrete is considered in the article. Research of steelfiber concrete patterns based on cement and compositional astringent material was held. The fine-grained cement and the binder with low water demand were used as the main binder.

It is established that the application of composite binder and high density packing of the grains raises much the durability indicators. Algorithm and program for composition calculation of fine-grained steel fiber concrete based on technogenic sands enriched with Tavolzhansky sands, that allow to get more compact packing of elongated pieces are developed.

Optimal selection of filling material allowed to receive fiber concrete based on technogenic sand of Kursk Magnetic Anomaly with ultimate compressive strength equalled to 104,8 MPa, and with ultimate flexural strength 23,2 MPa for flexible structures.

References

1. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Concrete technology]. Moscow: ASV, 2003. 500 p. (rus)
2. Pukhareno *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2004. No. 10. Pp. 47–50. (rus)
3. Rabinovich F.N. *Dispersno-armirovannyye betony* [Fibre concretes]. Moscow: Stroyizdat, 1989. 174 p. (rus)
4. Rabinovich F.N. *Kompozity na osnove dispersno armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proyektirovaniya, tekhnologi, konstruksii* [Composites based on fibre concretes. The issue of the theory and design, technology, construction]. Moscow: ASV, 2004. 560 p. (rus)
5. Talantova K.V. *Beton i zhelezobeton*. 2003. No. 5. Pp. 4–8. (rus)
6. Brandt A.M. *Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance*. London: Spon, 2009. 544 p.
7. Fernandes G.R. La influencia de algunas caracteristicas de las arenas finas (arenas) en la propiedades des hormigon de cemento Portland. *Cemento e Hormigon*. 1976. Vol.47. No. 506. Pp. 415–428.
8. Herr O. Les materiaux autocompactants essorables de structure (MACES). Etude de faisabilite d'une nouvelle gamme de materiaux hydrauliques pour les assises de chaussees. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussees*. 2001. No. 232. Pp. 99–103.
9. Beaudoin J.J. *Handbook of Fiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and Applications (Building Materials Science)*. Noyes: William Andrew, 1990. 194 p.
10. Bernhard Maidl. *Steel Fibre Reinforced Concrete*. Wiley: Ernst & Sohn, 1995. 292 p.
11. Piasta J. Rheological Properties of Concretes with Fine Aggregate. *Cement and Concrete Research*. 1985. Vol. 15. No. 2. Pp. 253–260.
12. Steopoe A. Sur la structure des suspensions aqueuses des ciments purs ou melanges et sur les propriestes techniques de ces suspensions durcies. *Revue des Materiaux de conctructions*. 1981. No. 508. Pp.1 – 9.
13. Lesovik R.V. *Melkozernistyye betony na kompozitsionnykh vyazhushchikh i tekhnogennykh peskakh: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Fine concretes on grain binders and technogenic sands. PhD dissertation]. Belgorod: 2009. 496 p. (rus)
14. Cherkashin, Yu.N. *Melkozernistyye betony dlya energeticheskogo stroitelstva na obogashchennykh peskakh kurskoy magnitnoy anomalii: avtoref. diss. ... kand. tekhn. Nauk* [Fine concretes for energy construction on enriched sands of Kursk magnetic anomaly. Thesis abstract of PhD dissertation]. Belgorod: 2006. 24 p. (rus)

15. Klyuyev A.V. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2010. No. 4. Pp. 81–84. (rus)
16. Klyuyev A.V. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2011. No. 2. Pp. 60–63. (rus)
17. Klyuyev S.V., Lesovik R.V. *Beton i zhelezobeton*. 2011. No. 3. Pp. 7–9. (rus)
18. Klyuyev S.V., Lesovik R.V. *Beton i zhelezobeton*. 2011. No. 6. Pp. 4–6. (rus)
19. Klyuyev S.V. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*. 2011. No. 4. Pp. 71-74. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 61-66