

## Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций

*Д.т.н., профессор Р.В. Лесовик;  
к.т.н., доцент, докторант С.В. Ключев\*,*

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

**Ключевые слова:** мелкозернистый бетон; техногенный песок; фибробетон

На сегодняшний день разработаны высокопрочные и высококачественные бетоны прочностью на сжатие 120 МПа и выше, необходимые при строительстве уникальных зданий и сооружений. Несмотря на то, что прочность на сжатие достаточно велика, существует потребность в увеличении прочностных показателей конструкций, работающих преимущественно на изгиб, так как прочность этих бетонов на растяжение повышается незначительно, что снижает возможности и эффективность их применения [1].

Для повышения прочностных показателей перечисленных бетонов применяются различные способы: дисперсное армирование бетона волокнами (фиброй) – стальными, стеклянными, базальтовыми, целлюлозными, синтетическими, углеродными и др. [2 – 12].

Ценность 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 [2–5].

Эффективность применения фибробетонных конструкций в этих случаях может быть достигнута за счет снижения трудозатрат на арматурные работы, сокращения расхода стали и бетона (за счет уменьшения толщины конструкций), совмещения технологических операций приготовления – бетонной смеси и ее армирования, что, в конечном итоге, приводит к снижению трудоемкости изготовления конструкций на 25–35% и экономии строительных материалов на 1 м<sup>3</sup> готового изделия. Кроме того, эффективность использования фибробетона может выражаться в увеличении долговечности конструкций и снижении затрат на текущий ремонт.

Исследования, посвященные дисперсно-армированному бетону были выполнены Российским инженером В.П. Некрасовым в начале XX в. В России основу знаний о сталефибробетоне сформировали ученые: 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. [7–12].

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. [13 – 20].

Однако вышеперечисленные исследования были проведены на цементе и кварцевом песке. В данной работе в качестве основного заполнителя предлагается использовать техногенные пески Курской магнитной аномалии – отсев дробления кварцитопесчанника (отсев дробления КВП), а в качестве вяжущего – вяжущее низкой водопотребности (ВНВ-70) и тонкомолотый цемент (ТМЦ-70).

Основной задачей данной работы является разработка принципов проектирования и технологий производства дисперсно-армированного мелкозернистого бетона с учетом особенностей минералогического состава, строения и свойств техногенных песков.

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 обращают на себя внимание основные принципиальные различия этих материалов. Если первые являются в основном кварцевыми, с округлой формой зерен и гладкой поверхностью, то вторые имеют существенные Лесовик Р.В., Ключев С.В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций

различия по составу и свойствам исходных пород, форме зерен и шероховатости их поверхности (рис. 1).

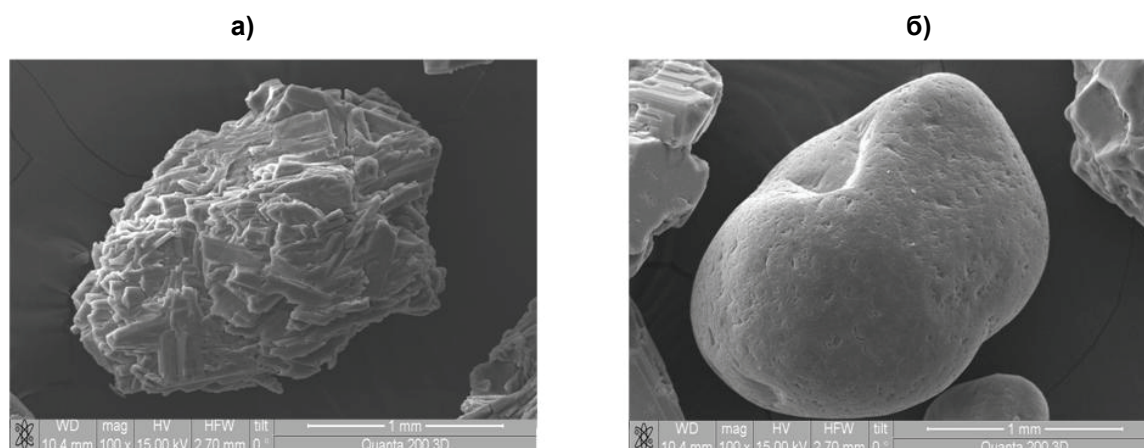


Рисунок 1. Зерно: а) техногенного песка; б) природного песка

Основные физико-механические свойства заполнителей представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики заполнителя

Наименование показателя	Отсев дробления КВП	Таволжанский песок
Модуль крупности	3,50	1,38
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1490	1448
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	2710	2630
Пустотность, %	47,8	44,9
Водопотребность, %	5,5	7

Основной задачей при получении мелкозернистых бетонов, в том числе дисперсно-армированных, является снижение расхода клинкерной составляющей, т.к. из-за отсутствия крупного заполнителя идет перерасход цемента. Наиболее существенными факторами снижения содержания цемента в мелкозернистых бетонах являются уменьшение водопотребности бетонной смеси и повышение активности вяжущего. Поэтому перспективным направлением повышения эффективности мелкозернистого бетона является применение композиционных вяжущих.

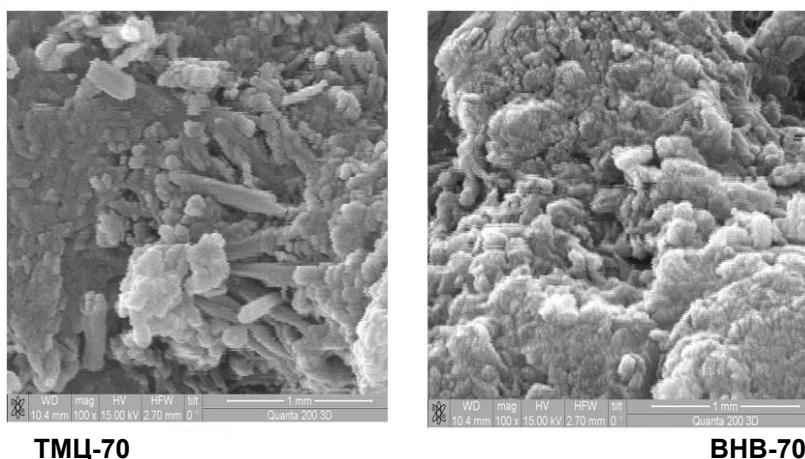
Вяжущее тонкомолотый цемент (ТМЦ-70) получали путем домола до удельной поверхности  $S_{уд}=500$  м<sup>2</sup>/г портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н. Вяжущее низкой водопотребности (ВНВ-70) получали путем совместного помола до удельной поверхности 500 м<sup>2</sup>/кг портландцемента и пластифицирующей добавки СП-1 в оптимальной дозировке.

Были определены основные характеристики разработанных вяжущих (табл. 2). Как видно из результатов исследований, вяжущее ВНВ-70 характеризуется более высокой активностью по сравнению с цементом ЦЕМ I 42,5 Н и ТМЦ-70.

Таблица 2. Физико-механические характеристики композиционных вяжущих

Наименование вяжущего	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	НГ, %	Начало схватывания, час.	Конец схватывания, час.	Активность	
					при изгибе, МПа	при сжатии, МПа
ЦЕМ I 42,5Н	320	25,2	2,30	3,30	7,8	49,3
ТМЦ – 70	504	23,8	2,15	3,15	10,2	57,4
ВНВ-70	520	22,5	1,50	2,50	11,1	68,9

На РЭМ-изображениях (растрового электронного микроскопа) четко различаются границы между частицами и пораами (рис. 2), что благоприятствует проведению количественного анализа микроструктуры.

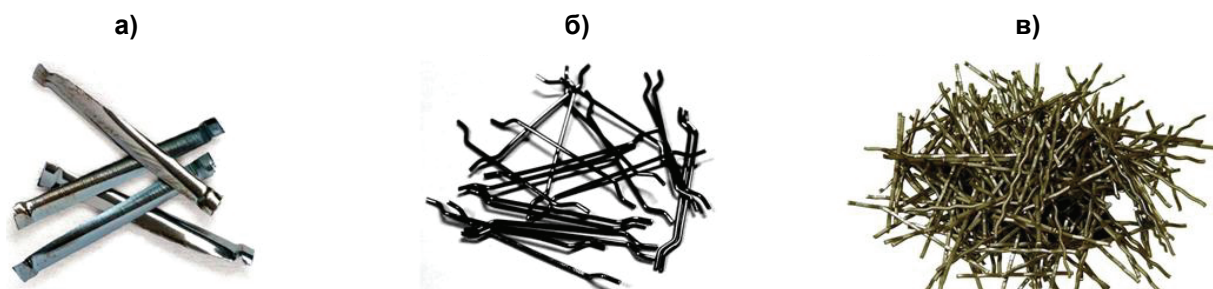


**Рисунок 2. Изменение морфологии новообразований в зависимости от состава вяжущего**

Для оценки целесообразности применения конкретного вида фибры при производстве высококачественного мелкозернистого сталефибробетона были разработаны составы, в которых в качестве заполнителя был применен отсев дробления кварцитопесчаника. Для оптимизации структуры матрицы и получения высокоплотной упаковки зерен заполнителя в состав бетона был введен Таволжанский песок. В качестве вяжущего были применены ЦЕМ I 42,5 Н, ТМЦ-70 и ВНВ-70.

Также в составы были введены три вида фибры (рис. 3):

- фибра стальная волнообразная длина 30 мм, диаметр 0,8 мм;
- фибра стальная анкерная длина 50 мм, диаметр 0,8 мм;
- фибра стальная плоская длина 32 мм, ширина 3,2 мм.



**Рисунок 3. Виды стальной фибры: а) плоская фрезерованная; б) анкерная; в) волновая**

Экспериментальные исследования были связаны с изучением поведения бетонных элементов, дисперсно-армированных стальной фиброй, при определении прочностных и деформативных характеристик.

Фибробетонную смесь готовили в два этапа. Сначала в растворе-смесителе получали бетонную смесь. Производилось сухое смешивание компонентов, затем небольшими порциями затворялась вода. Перемешивание длилось 5 – 10 минут в зависимости от консистенции смеси.

На втором этапе выполнялось армирование. Для этого экспериментальным путем определяли количество бетонной смеси, необходимое для формирования одного образца. Далее в приготовленную бетонную смесь добавлялась фибра, заранее отмеренная согласно проценту армирования.

После этого смесь перемешивалась механизированным способом и в ручную укладывалась в очищенные формы, тщательно смазанные маслом. Уплотнение фибробетонной смеси выполнялось на вибростоле до появления цементного молока. После формирования и уплотнения образцы в течение 24 часов находились при температуре не ниже 15°C. Затем формы были сняты, и бетонные образцы находились в камере твердения с температурой 20°C и влажностью более 90%, что соответствует требованиям ГОСТ.

Испытание образцов для определения вышеперечисленных характеристик проводилось на универсальной испытательной машине по стандартной методике. Бетонная матрица для всех типов фибры изготавливалась из мелкозернистого бетона одного состава. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

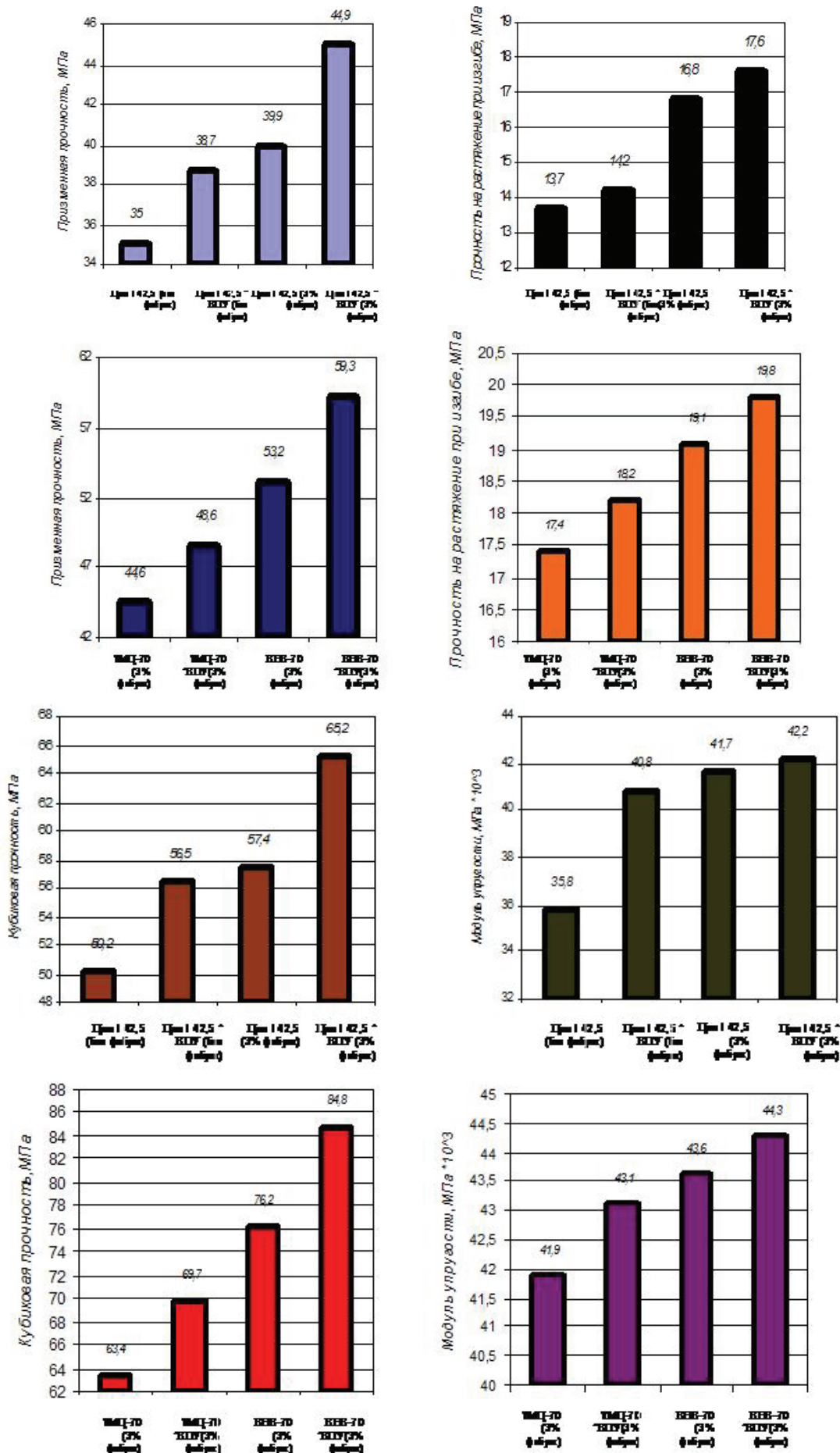


Рисунок 4. Результаты экспериментальных исследований сталефибробетона

Лесовик Р.В., Клюев С.В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций

**Таблица 3. Результаты испытаний мелкозернистых бетонных образцов, в том числе дисперсно армированных стальной фиброй**

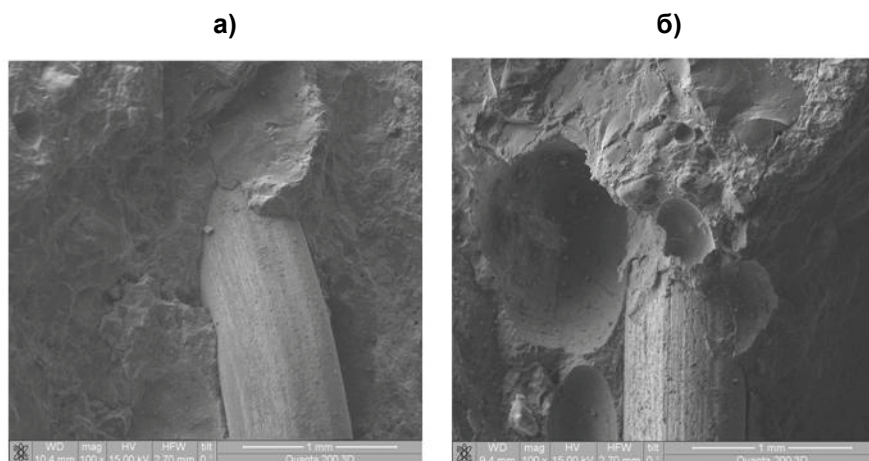
Определяемая характеристика	Размерность	Без фибры	Виды фибр		
			плоская фрезерованная	анкерная	волновая
Кубиковая прочность	МПа	50,2	56,3	55,8	57,4
Призменная прочность	МПа	35,0	39,2	38,7	39,9
Прочность на растяжение при изгибе	МПа	13,7	15,9	16,6	16,8
Модуль упругости	МПа	$35,8 \cdot 10^3$	$41,1 \cdot 10^3$	$39,8 \cdot 10^3$	$41,7 \cdot 10^3$

Для трех видов фибр было испытано 36 образцов. Анализ табл. 3 показывает, что сталефибробетон с использованием волновой фибры в качестве армирующего материала обладает наилучшими прочностными характеристиками. Для дальнейшего исследования дисперсного армирования мелкозернистого бетона рекомендуется применять волновую фибру [3].

Перспективным направлением повышения эффективности мелкозернистого сталефибробетона является применение композиционных вяжущих. В данной работе в качестве композиционного вяжущего применяется ТМЦ-70 и ВНВ-70 (рис. 4).

Исследования показали целесообразность использования высокоплотной упаковки зерен мелкозернистого бетона и дисперсного армирования для получения высокопрочного сталефибробетона. Несмотря на достижения более высоких физико-механических характеристик целесообразно применение таких композиционных вяжущих как ТМЦ-70 и ВНВ-70.

Для изучения микроструктуры контактной зоны стальной волновой фибры и цементного камня были проведены исследования с помощью РЭМ (рис. 5).



**Рисунок 5. Микроструктура контактной зоны цементный камень – фибра: а) на ВНВ-70; б) на Цем I 42,5Н**

Как видно из исследований микроструктуры, а также исходя из результатов испытаний и визуального осмотра образцов после испытаний, контактная зона «композиционное вяжущее – фибра» имеет более плотную связь и прочность сцепления. Фибра в образцах после испытаний имела более ровный вид.

Микроструктура «цементный камень – фибра» имеет менее прочную взаимосвязь. Структура контактной зоны рыхлая, чешуйчатая. Фибра в образцах после испытаний на Цем I 42,5Н, заметно отличалась от фибры в образцах, выполненных с применением ВНВ-70.

На следующем этапе исследования изучалось влияние вида вяжущего и генетических особенностей основного заполнителя на долговечность и прочностные характеристики сталефибробетона (рис. 6).

Степень гидратации исследуемых составов оценивали по изменению интенсивности отражений алита и белита ( $2,76$  и  $2,78$  Å) в области межплоскостных расстояний  $20$ – $32$ – $33^\circ$ , являющихся наиболее информативными для данных систем.

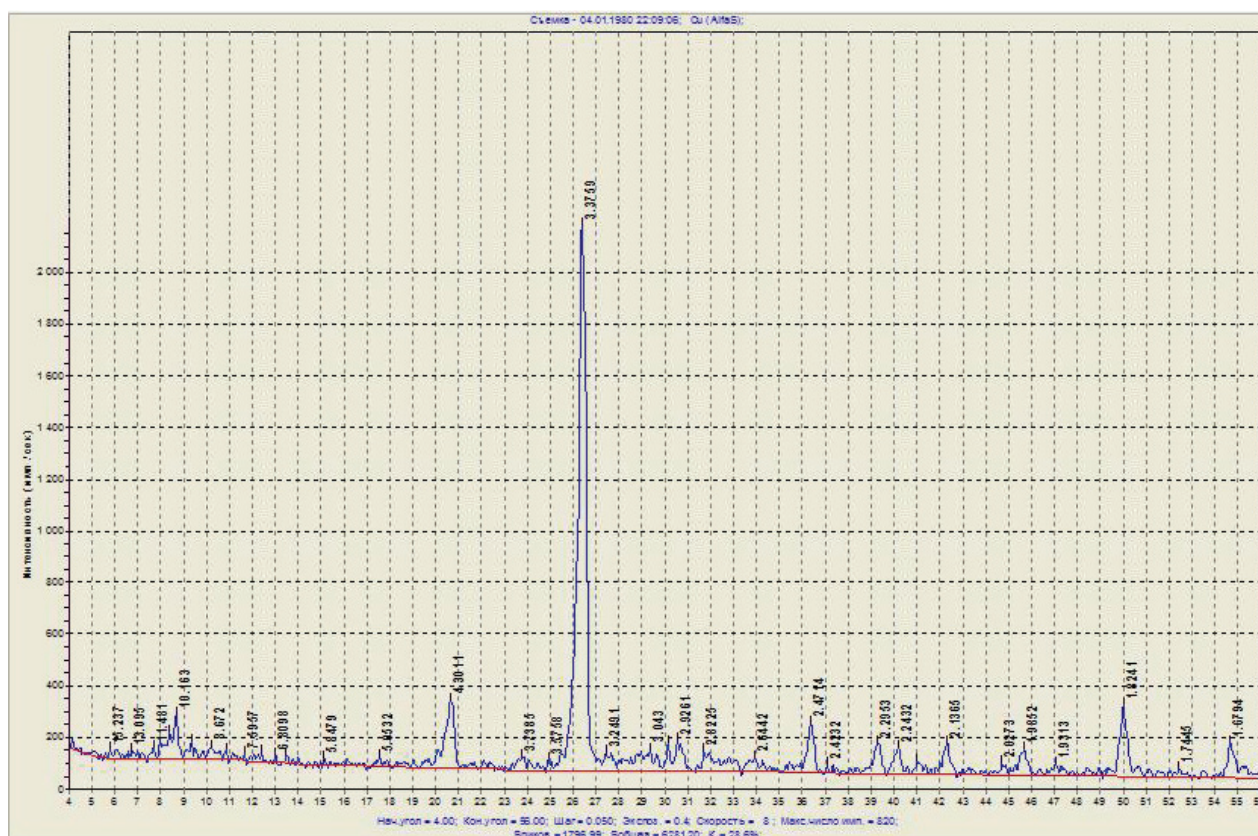


Рисунок 6. Дифрактограмма образца на ВНВ-70 + высокоплотная упаковка зерен

### Выводы

Анализ образцов мелкозернистого сталефибробетона на ЦЕМ I 42,5 показал, что в нем сохраняется больше клинкерных минералов по сравнению с образцом на ВНВ-70 мелкозернистого сталефибробетона. В мелкозернистом сталефибробетоне с высокоплотной упаковкой на ВНВ-70 по сравнению с остальными образцами произошла более полная гидратация исходных клинкерных минералов. Это позволило получить бетон с максимальной прочностью вследствие наиболее оптимального распределения минералов в теле образца.

Экспериментально установлена возможность повышения эффективности дисперсно-армированного мелкозернистого бетона за счет использования высокоплотной упаковки зерен мелкозернистого бетона и применения композиционных вяжущих. Рациональный подбор заполнителя позволил получить на техногенных песках Курской магнитной аномалии сталефибробетон с пределом прочности при сжатии 84,8 МПа, при изгибе 19,8 МПа для изгибаемых конструкций.

Ранее авторами разработан алгоритм расчета многофункциональной системы «клинкер – наполнитель – заполнитель – органическая добавка – вода», позволяющий варьировать параметры при оптимизации состава мелкозернистого бетона с целью повышения прочностных, деформативных и эксплуатационных характеристик композита. Его реализация в экспериментальных условиях позволила увеличить вышеперечисленные характеристики на 20–30% [6].

Выявлен микроармирующий эффект наполнителя композиционного вяжущего за счет кремнеземсодержащих компонентов матрицы, что объясняется удлинением габитуса частиц, микрошероховатостью поверхности и высокой адгезией частиц наполнителя к цементному камню, которая и предопределяет наилучшее сцепление цементного камня с фиброй. Внешним проявлением этого сцепления является выпрямление волновой фибры в зоне растяжения.

Разработанные составы дисперсно-армированного мелкозернистого бетона были внесены в проект строительства торгово-оздоровительного комплекса в г. Белгороде по ул. К. Заслонова, 173 (ООО «Элит-А»).

Данная работа выполнена 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».

Лесовик Р.В., Клюев С.В. Фибробетон на композиционных вяжущих и техногенных песках Курской магнитной аномалии для изгибаемых конструкций

## Литература

1. Баженов Ю. М. Технология бетона. М.: АСВ, 2003. 500 с.
2. 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.
3. Ключев А. В. Сталефибробетон для сборно-монолитного строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 60–63.
4. Ключев С. В., Лесовик Р. В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна // Бетон и железобетон. 2011. № 3. С. 7–9.
5. Ключев С. В., Лесовик Р. В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон стекловолокном // Бетон и железобетон. 2011. № 6. С. 4–6.
6. Ключев С. В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 4. С. 71–74.
7. Коротышевский О. В. Расчет сталефибробетона по прочности на осевое растяжение и на растяжение при изгибе // Строительные материалы. 2003. №8. С. 31–33.
8. Пухаренко Ю. В. Принцип формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. № 10. С. 47–50.
9. Рабинович Ф. Н. Дисперсно армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. 174 с.
10. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологи, конструкции. М.: АСВ, 2004. 560 с.
11. Талантова К. В. Основы создания сталефибробетонных конструкций с заданными свойствами // Бетон и железобетон. 2003. № 5. С. 4–8.
12. Талантова К. В. Создание элементов конструкций с заданными свойствами на основе сталефибробетона // Известия вузов. Строительство. Новосибирск. 2008. № 10. С. 4–9.
13. Brandt A. M. Cement-Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance // Spon Press; 2 edition. 2009. March. 544 p.
14. 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.
15. 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.
16. Jeffrey M. Lemm HB Fiber-Reinforced Concrete: Principles, Properties, Developments and Applications (Building Materials Science) // William Andrew; illustrated edition. 1990. Feb. 194 p.
17. Maidl B. Steel Fibre Reinforced Concrete. Wiley-VCH, 1995. 292 p.
18. Piasta J. Rheological Properties of Concretes with Fine Aggregate // Cement and Concrete Research. 1985. Vol. 15. №2. Pp. 253–260.
19. Steopoe A. Sur la structure des suspensions aqueuses des ciments purs ou mélanges et sur les propriestes techniques de ces suspensions durcies // Revue des Materiaux de conctructions. 1981. №508. Pp. 1–9.
20. Takemura K. Some Properties of Concrete Using Crushed Stone Pust as Fine Aggregate // The Cement Association of Japan. 13-th General Meeting Technical Session. Tokyo: 1976, YI Review. Pp. 95–97.

\* Сергей Васильевич Ключев, Белгород, Россия

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