

РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ И МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ФИБРОБЕТОНОВ НА ИХ ОСНОВЕ

ruslan_lesovik@mail.ru

**Лесовик Р.В., д-р техн. наук, проф.,
Агеева М.С., канд. техн. наук, доц.,
Клюев С.В., канд. техн. наук, доц.,
Лесовик Г.А., канд. техн. наук,
Сопин Д.М., канд. техн. наук**

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

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы применения фибры для дисперсного армирования мелкозернистых бетонов. Показана возможность использования техногенного сырья при производстве высококачественных фибробетонов, используемых для монолитного строительства.

Ключевые слова: фибробетон, армирование, техногенное сырье, композиционное вяжущее.

Перспективным направлением для получения высокопрочных бетонов, является их микроармирование. Дисперсное армирование обеспечивает трехмерное упрочнение композитов и позволяет принципиально изменять свойства цементного камня и других видов искусственных композитов, обеспечивая им высокую трещиностойкость, повышая сопротивление ударным и динамическим нагрузкам и т.д. [1 – 4].

Решение проблемы снижения себестоимости таких материалов возможно за счет использования композиционных вяжущих веществ, многокомпонентность состава которых позволяет не только снизить клинкерную составляющую в смеси, но и эффективно управлять процессами структурообразования, обеспечивая высокое качество получаемых бетонов и изделий на их основе.

Введение наполнителей, которые можно представить как частицы дисперсной фазы с другими показателями поверхностного натяжения, чем элементарные структурные элементы вяжущего, изменяют энергетическое состояние дисперсной системы. Выбор и назначение наполнителей в основном зависит от их химической активности. Эффективные наполнители имеют полифункциональное значение в синтезе материалов с заранее заданными свойствами. В реальных условиях имеет место уплотнение цементного камня (снижение

содержания крупных капиллярных пор) не только за счет создания более плотной упаковки исходных компонентов, но и за счет изменения химизма процессов твердения вяжущего [5 – 10].

В работе были проведены исследования по влиянию количества и вида наполнителей на активность композиционного вяжущего, которое получали путем совместного помола цемента и добавок. Удельная поверхность составляла 600 м²/кг.

Для получения вяжущих были использованы следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I 32,5Н ГОСТ 31108–2003 ЗАО «Белгородский цемент», Новолипецкий доменный гранулированный шлак с Мо =1,14 и Ма=0,2, минеральный пластификатор Tricosal 181, по существу дополняющий гранулометрический состав вяжущего, отходы мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов (ММС) (табл. 1-3).

Таблица 1 – Химический состав добавки «TRICOSAL-181»

Оксид	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O
Tricosal-181, %	1,55	1,66	0,283	89,1	0,629	6,37	0,23

Таблица 2 – Химический состав минеральных компонентов вяжущего

Оксид	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	CO ₂
Шлак	37,1	7,3	0,65	-	41,4	9,4	1,83	0,59	0,35	1,02	-
ММС	77,8	0,57	6,58	7,12	1,5	2,26	0,128	-	-	-	3,63

Таблица 3 – Физические свойства доменного гранулированного шлака ОАО «НЛМК»

Параметры	Значения
Активность в возрасте, МПа	
3 сут	0,11
7 сут	2,5
28 сут	19,1
Плотность насыпная в сухом состоянии, кг/м ³	1090
Плотность истинная, кг/м ³	2820
Водопоглощение, %	15
Модуль крупности	2,71
Модуль основности	1,14

Основные экспериментальные исследования проводились в Центре высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, испытательном центре «БГТУ - сертис», в лабораториях кафедр архитектурно-строительного института и института строительного материаловедения Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова.

Исследования структурно-фазового состояния проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ARLX'TRA; рентгенофлуоресцентный анализ элементов - ARL9900 Intellipower Workstation.

Для получения микрофотографий поверхности, размера зерен, микроструктуры затвердевших вяжущих был использован сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU, включающий энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) X-MAX 50 Oxford Instruments NanoAnalysis для электронно-зондового микроанализа.

Для выявления действия добавки Tricosal 181 и Новолипецкого доменного гранулированного шлака на композиционные вяжущие были подготовлены составы с добавкой в количестве 0,5% от массы цемента. Добавка в КВ вводилась при помоле вяжущих до удельной поверхности 600 м²/кг. Изучались составы с разным расходом шлака: 10,20 и 50%.

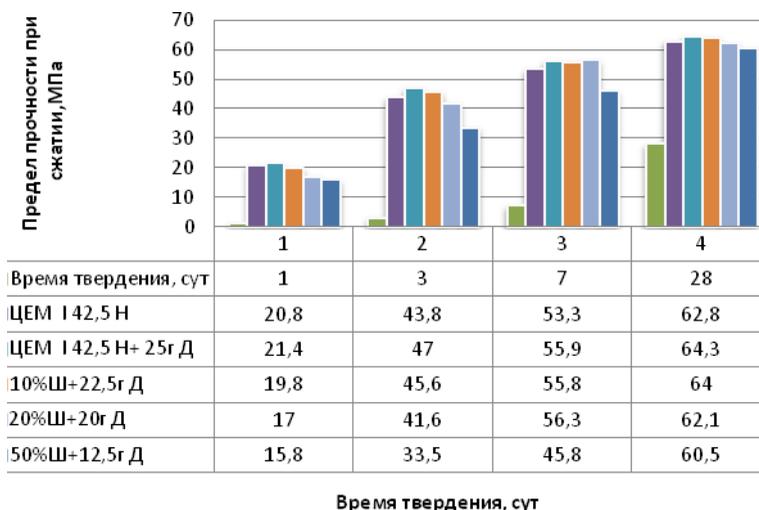


Рисунок 1 – Кинетика твердения КВ на основе шлака

При сравнении активности вяжущих наблюдалось повышение прочности для всех составов (рис. 1). В ранние сроки шлак замедляет процесс гидратации, а уже к 28 суткам прочностные показатели всех вяжущих, становятся равными прочности клинкера, а в некоторых случаях и превосходят ее. Добавка шлака 10 и 20% практически не снижает прочностных показателей вяжущих по сравнению с исходным

клинкером во все сроки твердения. КВ с 50 % шлака достигает значений прочности молотого клинкера к 28-ми суточному сроку твердения.

Это связано с тем, что высокий пластифицирующий эффект добавки обусловлен высокой дисперсностью и минеральным составом, благодаря чему при смешивании с водой она образует коллоидный клей и физически связывают большое количество воды, уплотняя структуру. При этом ее частицы, являясь затравками, подложками и центрами кристаллизации шлакового стекла, оказывают каталитическое воздействие на процессы гидратации и твердения вяжущего. При этом после формования в начальном процессе гидратации частички добавки адсорбируют значительное количество воды, тем самым снижая водовязущее отношение, а это приводит к активизации процессов структурообразования и синтезу более мелких кристаллов гидросиликатов кальция, что несомненно отражается на оптимизации микроstructures цементного камня по сравнению с контрольными образцами.

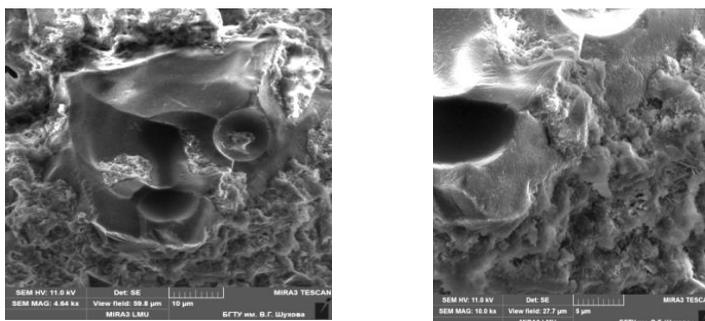


Рисунок 2 – Микроstructure композиционного вяжущего на основе шлака

Изучение микроstructures образцов с добавкой 0,5% от расхода клинкера и 50% шлака показало, что полученный материал характеризуется плотной матрицей (рис. 2). Шлаковый наполнитель имеет хорошую адгезию с цементным камнем. При этом частицы добавки, являясь затравками, подложками и центрами кристаллизации шлакового стекла, оказывают каталитическое воздействие на процессы гидратации и твердения вяжущего. Помимо этого, мельчайшие частицы наполнителя, как и негидратировавшие цементные зерна, также являются дополнительными центрами кристаллизации, что хорошо заметно на микрофотографиях.

Затвердевший шлакопортландцементный камень характеризуется меньшим содержанием кристаллического портландита, частично связанного зернами шлака и более плотной гидросиликатной гелевой структурой (рис. 2). Этими особенностями структуры объясняются высокая водонепроницаемость и устойчивость к агрессивным средам.

Также были получены различные составы вяжущих: тонокомолотый цемент (ТМЦ 100) и композиционные вяжущие, состоящие из цемента и добавок (КВ 100 и КВ 80 ММС). В качестве основы для получения таких вяжущих был выбран ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Белгородский цемент» (г. Белгород). Композиционное вяжущее получали путем домола портландцемента с пластифицирующей добавкой «Полипласт ПРЕМЕИУМ» в вибромельнице до удельной поверхности 600 м²/кг.

Были определены основные характеристики разработанных вяжущих (табл. 4).

Таблица 4 – Физико-механические характеристики композиционных вяжущих

Наименование вяжущего	Удельная поверхность, м ² /кг	Начало схватывания, час.	Конец схватывания, час.	Активность	
				при изгибе, МПа	при сжатии, МПа
ЦЕМ I 42,5Н	320	2,30	3,30	7,8	51,3
ТМЦ – 100	600	2,15	3,15	15,2	67,4
КВ-100	600	1,50	2,50	18,1	78,9
КВ-80 (ММС)	600	2,05	3,00	10,9	56,9
КВ-80 (шлак)	600	3,20	4,00	15,7	62,1

Как видно из результатов исследований вяжущее КВ-100 характеризуется более высокой активностью по сравнению с цементом ЦЕМ I 42,5 Н и другими вяжущими.

Таким образом, применение композиционных вяжущих таких как позволяет повысить характеристики бетона, по сравнению с аналогичными составами на основе цемента. Что объясняется более плотной структурой цементного камня самих композиционных

вяжущих, и, следовательно, бетонов на их основе, а также меньшей пористостью.

Взаимодействие между волокнами и матрицей – фундаментальное свойство, которое влияет на качество основанного на цементе волокнистого композиционного материала. Чтобы уяснить взаимодействие между волокнами и матрицей и предсказать поведение композита, привлекается множество факторов. Вот наиболее важные параметры, влияющие на взаимодействие волокна и матрицы: состояние матрицы – без трещин или с трещинами; композиция матрицы; характеристики типа, геометрии и поверхности волокна; жесткость волокна в сравнении с жесткостью матрицы; ориентация волокон; объемная доля волокон; продолжительность функционирования волокна в композите [11, 12].

Производственная практика показала, что армирование бетона стекловолокном, обладающим высокой химической устойчивостью к щелочной среде, стало возможным благодаря направленной выработке волокон из стекол специальных составов [13 – 20]. Использованное в экспериментах цементостойкое волокно выпускается в виде ровинга РЦР-15-190-2520-9. Цифры обозначают: диаметр элементарного волокна в мкм –15; линейная плотность комплексной нити – 190; линейная плотность ровинга – 2520; номер замазливателя – 9. Разрывная нагрузка ровинга –500 Н; предел прочности при растяжении – 1600 МПа; предельная деформация при растяжении 2,2%; модуль упругости – 72 ГПа; модуль сдвига – 29,1 ГПа.

Для формования образцов изосдвига использовались доступные местные материалы. Использовался песок, применяемый для изготовления мелкозернистого бетона. Его характеристики определялись по методикам ГОСТ 8835-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Модуль крупности песка – 2,56; насыпная плотность – 1700 кг/м³.

В экспериментальных исследованиях применялся товарный цемент ЗАО «Белгородский цемент» марки ЦЕМ I 42,5 Н. Белгородская водопроводная вода имеет рН=7,12 (рН дистиллированной воды 6,5), ее карбонатная жесткость – 5,5-5,6 Мгэкв/л.

Практика использования стекловолокна для дисперсного армирования бетона показала, что с точки зрения длительности сохранения армирующего качества приемлемо волокно диаметром 13-15 мкм, чему соответствует использованный ровинг.

В качестве варьируемых параметров были приняты длина волокон (20, 35 и 50 мм) и процент армирования (1,5; 3,0 и 4,5) по массе при

отношении цемента и песка 1:3. Выходными параметрами были средняя плотность стеклофибробетона (ρ), предел прочности при сжатии (σ_{bf}), предел прочности на растяжение при изгибе σ_t .

Высушенный песок, цемент и стекловолокно были смешаны до получения гомогенного состава. Затем добавлялась вода до образования однородной массы. После формования и уплотнения образцы находились под влажной мешковиной в течение 24 часов при температуре не выше 15°C. Затем были сняты формы и бетонные 100-мм кубики и призмы 120x120x480 мм перенесены в сухое место (в камеру твердения с температурой 20°C и влажностью более 90%, что соответствует требованиям ГОСТ 18105.0-80 и 8829-85). Испытания образцов производились на универсальной машине УММ-10 по стандартной методике (ГОСТ 101180-90). Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Результаты испытаний образцов из стеклофибробетона

NN серий образцов	волокна		ρ , кг/м ³	σ_{bf}		σ_t	
	длина, мм	% по массе		велич., МПа	прирост, %	велич., МПа	прирост, %
без волокон			2250	23,0		3,6	
1	20	1,5	2240	27,1	17,8	5,2	44,4
2	20	3,0	2230	27,4	19,1	6,0	66,7
3	20	4,5	2220	24,0	4,3	6,3	75,0
4	35	1,5	2230	29,5	28,3	7,0	94,4
5	35	3,0	2210	28,2	22,6	8,5	136,1
6	35	4,5	2190	20,0	-13,0	9,0	150,0
7	50	1,5	2220	17,9	-22,2	7,1	97,2
8	50	3,0	2190	17,7	-23,0	9,5	165,9
9	50	4,5	2160	17,0	-26,1	10,0	172,8

Анализ результатов испытаний кубиков при варьировании длины волокна и процента армирования свидетельствует, что при введении стекловолокна в количестве 4,5% и более наблюдается тенденция к снижению предела прочности бетона при сжатии. При введении стекловолокна в количестве 1,5 и 3% с длиной волокон 20 и 35 мм наблюдается повышение прочности бетона при сжатии (до 28%), а при увеличении длины волокна до 50 мм она имеет тенденцию к снижению.

Известно, что любые включения являются концентраторами напряжений, что в данном случае проявляется в значительной мере при длине стекловолокна свыше 35 мм и при увеличении армирования до 4,5% . Но в то же время оптимальная система включений способна притормозить, а в некоторых случаях и полностью остановить развитие трещин.

Соответствующий анализ результатов испытаний призм свидетельствует, что предел прочности бетона на растяжение при изгибе растет как при увеличении длины волокна, так и при росте процента армирования.

Жесткость пространственного каркаса из пленок вяжущего вещества обычно обусловлена его разновидностью. Жесткие перегородки кристаллизационного характера в мелкозернистом бетоне практически не реагируют на температуру окружающей среды. Включение стекловолокон делает перегородки подвижными, обладающими релаксационной способностью, что позволяет снять часть напряжений, возникающих в образце.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что стекловолокно является эффективным дисперсным армирующим элементом для мелкозернистого бетона. С увеличением процентного содержания стекловолокон и их длины стабильно повышается прочность на растяжение при изгибе, что имеет немаловажное значение для повышения несущей способности конструкций, включающих изгибаемые элементы.

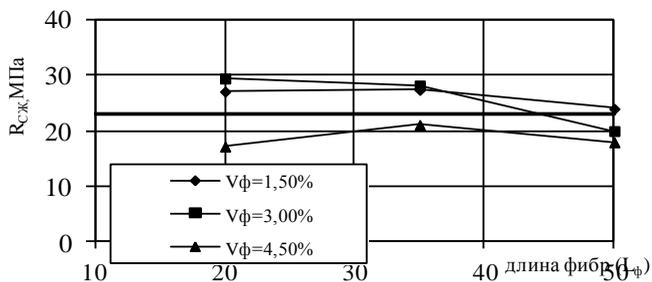


Рис.3. Зависимость между прочностью бетона на сжатие и длиной фибр

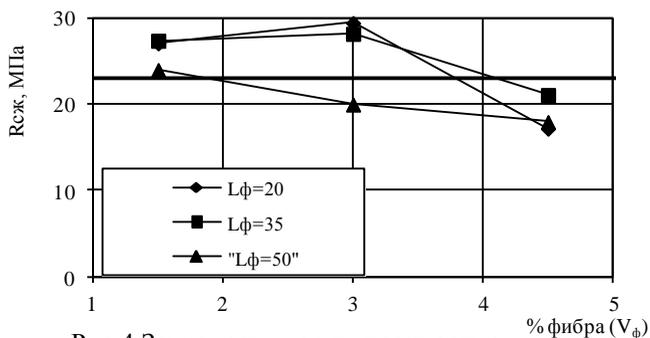


Рис.4. Зависимость между прочностью бетона на сжатие и % фибр

Анализ кривых (рис. 4 – 6) показал, что введение стекловолокна длиной 20 мм в количестве 1,5% увеличивает прирост прочности бетона на растяжение при изгибе на 44,5 %, при увеличении дозировки стекловолокна от 3 % до 4,5% отмечается повышение прочности бетона от 94,7 % до 97 %. При использовании стекловолокна длиной 50 мм в

количестве 1,5 % прирост показателя прочности бетона на растяжение при изгибе составляет 71%, при 3% –150 %, а при 4,5 % – 172%.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что стекловолокно является эффективным дисперсным армирующим элементом мелкозернистого бетона. С увеличением процентного содержания стекловолокна и длины фибры стабильно повышается прочность на растяжение при изгибе и тем самым повышается прочность конструкции.

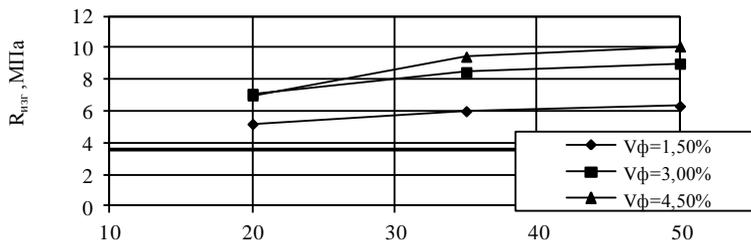


Рис.5. Зависимость между прочностью бетона на растяжение при изгибе и длиной фибры

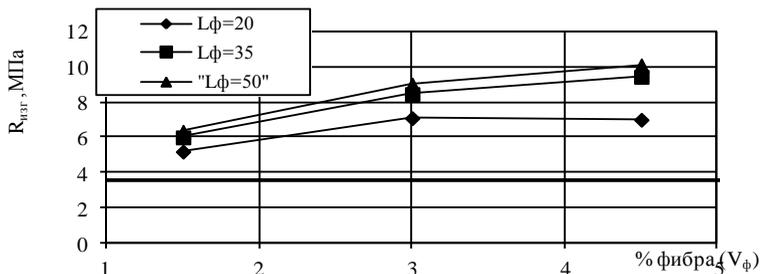


Рис.6. Зависимость между прочностью бетона на растяжение при изгибе и % фибры

Итак, на основе анализа результатов экспериментальных исследований осуществлена оценка эффективности влияния

дисперсного армирования мелкозернистого бетона стекловолокном. Использование стекловолокна более эффективно для повышения прочности мелкозернистого бетона на растяжение при изгибе.

Также были заформованы составы на основе разработанных композиционных вяжущих табл.6).

Таблица 6 – Результаты испытаний образцов из стеклофибробетона

NN серий образцов	волокна		ρ , кг/м ³	σ_{bf}		σ_t	
	длина, мм	% по массе		велич., МПа	прирост, %	велич., МПа	прирост, %
без волокон			2250	23,0		3,6	
ЦЕМ I 42,5 Н	50	4,5	2160	17,0	-26,1	10,0	172,8
КВ-80 ММС	50	4,5	2190	23,0		7,5	150
КВ-80 шлак	50	4,5	2260	25,5	10,8	11,5	219
КВ-100	50	4,5	2200	29,3	27,4	11,7	225

Анализ результатов показал положительное влияние композиционных вяжущих как на прочность при сжатии, так и на прочность при растяжении при изгибе.

Микроструктура композиции, основанной на КВ, оказывает существенное влияние на свойства композита. Затвердевшее тело содержит поры переменных размеров. Значительное изменение объема происходит вследствие ползучести и усадки при изменении температуры и влажности (рис. 7).



Рисунок 7 – Контактная зона фибры с композиционным вяжущим КВ100

Матрица и волокна образуют микроструктуру, которая принципиально отличается от микроструктуры матрицы. Зона взаимодействия существует вплоть до 50 мкм вглубь поверхности волокна. Эта зона содержит двойную пленку толщиной приблизительно 1-2 мкм, которая окружает волокно, область больших кристаллов СН, имеющую глубину вплоть до 30 мкм, и область, которая имеет достаточную пористость. Вклад зоны взаимодействия в механические свойства композита определяется процессом связывания и отслаивания волокна.

Таким образом, был оптимизирован гранулометрический состав минеральных компонентов вяжущих с учетом генезиса и морфологии поверхности частиц. Установлено, что оптимизация процессов структурообразования композиционных вяжущих происходит за счет последовательного роста новообразований при твердении системы «клинкерные минералы–наполнитель–вода–суперпластификатор», обусловленного разной интенсивностью и временем взаимодействия частичек наполнителя с продуктами гидратации клинкерных минералов.

Рациональный подбор заполнителя и наполнителя, а также использование стекловолокна в оптимальной дозировке позволили увеличить прочности бетона на растяжение при изгибе на 172% на портландцементе и до 225 % на композиционном вяжущем.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08006 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Лесовик Р.В., Ключев А.В., Ключев С.В. Мелкозернистый сталефибробетон на основе техногенного песка для получения сборных элементов конструкций // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. Белгород: Изд-во БГТУ. 2010. Ч.3. С. 140 – 143.
2. Ключев С.В., Лесовик Р.В., Ключев А.В. Фибробетон на техногенном песке КМА и композиционных вяжущих для промышленного и гражданского строительства // Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012. 124 с.
3. Ключев С.В. Фибробетон для тяжелонагруженных полов промышленных зданий: монография / С.В. Ключев, Р.В. Лесовик, А.В. Ключев, А.В. Гинзбург, С.А. Казлитин. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. 116 с.

4. Клюев С.В., Лесовик Р.В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон с использованием полипропиленового волокна // Бетон и железобетон. 2011. №3 С. 7 – 9.
5. Клюев С.В., Лесовик Р.В. Дисперсно-армированный мелкозернистый бетон стекловолокном // Бетон и железобетон. 2011. №6. С. 4 – 6.
6. Лесовик Р.В., Клюев С.В. Техногенные пески для производства высококачественного фибробетона // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. №8 (163). С. 31 – 33.
7. Лесовик Р.В., Агеева М.С., Клюев С.В., Лесовик Г.А., Сопин Д.М. Разработка методологии проектирования мелкозернистых фибротекстиль бетонов на техногенных песках белгородской области // Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. 2015. С. 227 – 241.
8. Лесовик Р.В., Клюев С.В., Клюев А.В., Нетребенко А.В. К проблеме использования техногенных песков КМА для производства мелкозернистого фибробетона и изделий на его основе // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №12. С. 45 – 48.
9. Пат. 2467972 Российская Федерация, МПК В 28С 5/40. Смесь для производства мелкозернистого сталефибробетона на основе отсева кварцитопесчаника / А.В. Клюев, С.В. Клюев, Р.В. Лесовик: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. № 2011111493/03; заявл. 25.03.2011; опубл. 27.11.2012.
10. Клюев А.В., Митрохин А.А., Черкашин Ю.Н., Лесовик Г.А. Расчет фибробетонных конструкций // Сборник научных трудов Sworld. 2014. Т. 18. №3. С. 61 – 65.
11. Клюев С.В., Клюев А.В., Сопин Д.М., Нетребенко А.В., Казлитин С.А. Тяжелонагруженные полы на основе мелкозернистых фибробетонов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №3. С. 7 – 14.
12. Клюев С.В., Лесовик В.С., Клюев А.В., Бондаренко Д.О. К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно-армированных бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2012. №4. С. 81 – 83.
13. Клюев А.В., Клюев С.В., Нетребенко А.В., Дураченко А.В. Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №4. С. 67 – 72.
14. Клюев С.В. Сталефибробетон на основе композиционного вяжущего // Белгородская область: прошлое, настоящее и будущее: материалы научн.-практ. конф. Белгород: Изд-во БГТУ. 2011. Ч.3. С. 32 – 36.
15. Клюев С.В. Фибробетон для каркасного строительства // Белгородская область: прошлое, настоящее и будущее: материалы научн.-практ. конф. Белгород: Изд-во БГТУ. 2011. Ч.3. С. 37 – 38.

16. Клюев С.В. Мелкозернистый сталефибробетон на основе отсева кварцитопесчаника // Белгородская область: прошлое, настоящее и будущее: материалы научн.-практ. конф. Белгород: Изд-во БГТУ. 2011. Ч.3. С. 27 – 31.
17. Клюев С.В., Авилова Е.Н. Мелкозернистый фибробетон с использованием полипропиленового волокна для покрытия автомобильных дорог // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 1. С. 37 – 40.
18. Lesovik R.V., Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Ntrebenko A.V., Metrohin A.A., Kalashnikov N.V. Combined Disperse Reinforcement of Fine-Grained Concrete with Steel and Polypropylene Fiber on Technogenic Raw Materials and Nanodispersed Modifier // World Applied Sciences Journal. 2014. T. 31. №12. P. 2008 – 2114.
19. Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Lesovik R.V., Ntrebenko A.V. High Strength Fiber Concrete for Industrial and Civil Engineering // World Applied Sciences Journal, 2013. 24 (10). P. 1280 – 1285.
20. Lesovik R.V., Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., Tolbatov A.A., Durachenko A.V. The Development of textile fine-grained fiber concrete using technogenic raw materials // Research Journal of Applied Sciences. 2015. №10 (10). P. 701 – 706.