

На правах рукописи



БАБАЕВ Виктор Борисович

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ ЦЕМЕНТОБЕТОН
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА
ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном
бюджетном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

- Научный руководитель** – доктор технических наук, профессор
Строкова Валерия Валерьевна
- Официальные оппоненты** – **Ядыкина Валентина Васильевна**
доктор технических наук, профессор
Белгородского государственного
технологического университета
им. В.Г. Шухова, зам. зав. каф.
автомобильных и железных дорог
- **Зайцев Петр Андреевич**
кандидат технических наук,
технический директор ООО "Биотех"
- Ведущая организация** – ФГБОУ ВПО «Сибирская государст-
венная автомобильно-дорожная акаде-
мия»

Защита состоится “05” июля 2013 года в 14³⁰ на заседании диссертаци-
онного совета Д.212.014.01 в Белгородском государственном технологиче-
ском университете им. В.Г. Шухова по адресу:
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242 ГК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО БГТУ
им. В.Г. Шухова.

Автореферат разослан “05” июня 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.

 Г.А. Смоляго

Актуальность. В настоящее время общая протяженность цементобетонных дорог в мире составляет более 30 %, тогда как в России более 90 % дорог характеризуются асфальтобетонным покрытием. Необходимо учитывать, что, по мнению экспертов, мировые запасы нефти будут истощены через 30 лет. При этом объемы производства цемента ежегодно возрастают.

К числу причин, сдерживающих внедрение цементобетона для покрытия дорог, является его невысокая прочность при изгибе. Одним из решений указанной проблемы является использование армирующих компонентов, в том числе неметаллической фибры, например базальтового волокна.

Однако базальтовое волокно характеризуется низкой щелочестойкостью, в том числе по отношению к цементному камню. Повышение эффективности базальтовой фибры возможно за счет ее модификации. Использование модифицированной фибры при производстве дорожного мелкозернистого цементобетона позволит получать материалы с необходимыми технико-эксплуатационными характеристиками.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: соглашение 14.В37.21.1218, государственное задание 3.4601.2011, программа стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

Цель и задачи работы. Разработка эффективного мелкозернистого цементобетона с использованием модифицированного базальтового волокна в качестве микроармирующего компонента для дорожного строительства.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение состава, свойств и микроструктурных особенностей базальтового волокна и разработка способа его модификации для повышения стойкости в щелочной среде;
- разработка составов и изучение свойств микроармированных мелкозернистых цементобетонов;
- расчет конструкций дорожных одежд с использованием мелкозернистого цементобетона, микроармированного базальтовым волокном;
- подготовка нормативных документов для реализации теоретических и экспериментальных исследований. Внедрение результатов исследований.

Научная новизна работы. Предложен принцип повышения эффективности мелкозернистого цементобетона, микроармированного базальтовой фиброй, заключающийся в повышении щелочестойкости базальтового волокна путем его термической обработки при 500 °С. Выявлен характер зависимости свойств цементобетона от способа введения термообработанного волокна и вида пластификатора. Наиболее эффективным является предварительное распушение волокна в воде затворения в присутствии нафталин-формальдегидного суперпластификатора с дальнейшим введе-

нием суспензии в формовочную смесь. Адсорбция пластификатора на поверхности фибры приводит к гидрофилизации ее поверхности, что способствует равномерному распределению волокна по объему смеси и, как следствие, повышению прочности бетона. Использование нафталин-формальдегидной добавки (СП-1 производства Полипласт) позволяет увеличить прочность при сжатии на 10% и при изгибе на 21 % по сравнению с составами на основе поликарбоксилатного пластификатора (SikaViscoCrete 125 Powder).

Предложена феноменологическая модель модификации базальтового волокна при термической обработке, основанная на переходе Fe^{2+} в Fe^{3+} в пироксеновой фазе стекла в окислительных условиях. Происходящая при этом смена координационного окружения Fe^{VI} в Fe^{IV} инициирует образование связей между $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$ -цепями и их трансформацию в каркасный структурный тип $[(\text{Fe}^{+3}, \text{Si}_2)\text{O}_6]^{-1}$ с образованием железосодержащих плагиоклазовых фаз. Увеличение количества кислотных брэнстедовских центров в два раза и интенсивности полос поглощения мостиковых связей Si–O–Si в области волновых чисел 1200 см^{-1} , соответствующих каркасным структурным фрагментам (Q^4), происходит за счет уменьшения количества цепочечных фрагментов (Q^2) и свидетельствует о повышении степени полимеризации анионного компонента при термообработке. Данные процессы приводят к уплотнению структуры фибры и способствуют повышению ее щелочестойкости, что подтверждается морфоструктурными особенностями поверхности термообработанного базальтового волокна, выдержанного в цементном растворе.

Установлены особенности структурообразования мелкозернистого цементобетона при использовании термически обработанного базальтового волокна в качестве микроармирующего компонента. Образование в поверхностном слое Si–ОН-связей объясняет формирование на поверхности волокна сетки из новообразованного вещества, которое, судя по его морфологии и размерам, обладает скрытокристаллической структурой. Модифицированное волокно выступает в качестве подложки для кристаллизации продуктов гидратации клинкерных минералов и имеет более высокую адгезию, чем необработанное волокно, за счет развитой поверхности и химического сродства с цементной системой. Сформированная на поверхности волокна плотная оболочка из новообразований препятствует дальнейшему взаимодействию волокна с активными компонентами цементного камня при эксплуатации.

Практическое значение работы. Обоснована целесообразность термической обработки базальтового волокна при температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$ с последующим охлаждением в воздушной среде при комнатной температуре для повышения его щелочной стойкости.

Разработаны составы мелкозернистого бетона с использованием термообработанного базальтового волокна, позволяющие получать материалы

с классом В25–В60 по прочности при сжатии и $B_{тб}2,8$ – $B_{тб}6,0$ по прочности при изгибе, морозостойкостью не менее F300 для верхнего и нижнего слоев покрытий автомобильных дорог I–IV категорий.

Разработаны номограммы по определению необходимого количества базальтового волокна, цемента и пластификатора для получения заданного класса прочности мелкозернистого бетона.

Произведен расчет конструкции дорожной одежды с использованием мелкозернистого цементобетона для II категории автомобильных дорог.

Предложена модель распределения демпфирующей нагрузки от колесного транспорта в слоях дорожной одежды в зависимости от применения разработанного бетона в слое покрытия автомобильных дорог.

Внедрение результатов исследований. Для апробации полученных результатов выпущена опытная партия бетонной смеси с использованием термообработанного базальтового волокна. Разработанный материал использовался в устройстве покрытия конусов при капитальном ремонте моста протяженностью 36 м на км 4+000 автодороги «Борисовка – Хотмыжск – Никитское» Борисовского р-на Белгородской обл.

Для внедрения результатов работы при строительстве, ремонте и реконструкции автомобильных дорог разработаны следующие технические документы:

- стандарт организации СТО 02066339-003-2012 «Мелкозернистый цементобетон армированный базальтовыми волокнами»;
- рекомендации по использованию термообработанного базальтового волокна при производстве цементобетона для дорожного строительства;
- технологический регламент на производство мелкозернистого бетона с использованием термообработанного базальтового волокна для дорожного строительства.

Теоретические положения диссертационной работы, результаты экспериментальных исследований и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 270800.62 «Строительство» профилям: «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», «Автомобильные дороги и аэродромы»; магистров по направлению 270800.68 «Строительство» магистерским программам: «Наносистемы в строительном материаловедении», «Технология строительных материалов, изделий и конструкций»; инженеров по специальностям 270106.65 «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» и 270205.65 «Автомобильные дороги и аэродромы».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены: на международном конгрессе «Наука и инновации в строительстве SIB–2008» (Воронеж, 2008); Международной научной конференции «Ломоносов» (Москва, 2009); Международном семинаре-конкурсе молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей (Москва, 2010); Международной научно-

практической конференции «Инновационные материалы и технологии» (Белгород, 2011); Международной научно-технической конференции молодых ученых «Исследования и инновации в ВУЗе» (Белгород, 2012); Международной научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона» (Саратов, 2013).

Публикации. Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 7 научных публикациях, в том числе в 2 статьях в центральных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. На составы бетона зарегистрировано ноу-хау № 20110011 «Цементо-фибробетон для дорожного строительства».

Объем и структура работы. Диссертация состоит из пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 180 странице машинописного текста, включающего 35 таблиц, 30 рисунков и фотографии, списка литературы из 155 наименований, 10 приложений.

На защиту выносятся:

- принцип повышения эффективности мелкозернистого цементобетона, микроармированного термообработанной базальтовой фиброй;
- способ и феноменологическая модель модификации базальтового волокна путем термической обработки для повышения его щелочестойкости;
- характер зависимости физико-механических свойств мелкозернистого цементобетона от способа введения термообработанного волокна и вида пластификатора;
- особенности структурообразования мелкозернистого цементобетона при использовании термически обработанного базальтового волокна в качестве микроармирующего компонента;
- оптимальные составы и технология производства мелкозернистого фибробетона для устройства слоя покрытия автомобильных дорог I–IV категорий, расчет дорожной одежды. Результаты апробации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В настоящее время при устройстве дорожных покрытий применяется широкий спектр технологических приемов. При этом конструкция и сечение дорожной одежды имеют массу вариантов, тогда как материалом для дорожной одежды выступают, как правило, асфальто- и цементобетон.

Основные преимущества дорожных одежд из цементобетона заключаются в том, что при примерно одинаковой строительной стоимости они обеспечивают значительно более долгий срок службы по сравнению с жесткими дорожными одеждами (в среднем в 2–3 раза и более). Таким образом, жесткие дорожные одежды требуют значительно меньших затрат на ремонт и эксплуатацию, обеспечивая при этом, более высокий уровень

логистического и транспортно-эксплуатационного состояния покрытия в течение всего срока службы автомобильных дорог.

Многолетний опыт эксплуатации цементобетонных покрытий на крупнейших автомагистралях страны, а также анализ зарубежного опыта позволяют объективно оценить недостатки покрытий данного типа, главными из которых являются разрушение поперечных швов и образование большого числа трещин, что обусловлено невысокой прочностью бетона при изгибе.

Одним из перспективных способов повышения прочностных характеристик бетона является дисперсное армирование. Для этого в настоящее время используют широкий спектр армирующих компонентов. При этом эффективность дисперсного армирования бетона и строительных растворов напрямую зависит от правильного выбора вида волокон, в соответствии с функциональным назначением армируемого материала.

В качестве сырьевых компонентов для получения дорожного цементобетона использовали цемент ЦЕМ I 42,5 Н производства ЗАО «Осколцемент», кварцевый песок Ново-Таволжанского месторождения Белгородской области, суперпластификаторы СП-1 производства ЗАО «Полипласт» и Sika Vesco Create производства Sika.

Выбор волокон для микроармирования в работе осуществляли на основе анализа применяемых в настоящее время фибр с учетом их физико-механических характеристик. По совокупности вариативных критериев, в качестве микроармирующего компонента было выбрано базальтовое волокно.

Исследования проводились на волокнах четырех предприятий (табл. 1). Их выбор был обусловлен тем, что годовой объем производства волокон на данных предприятиях составляет свыше 1000 т.

Таблица 1

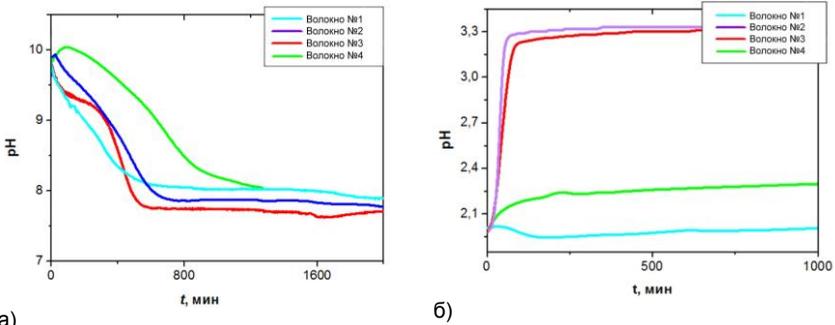
Характеристики базальтовых волокон крупных производителей РФ

Компания	Технология	Сырье	Диаметр, мкм
ОАО «Новгородский завод стекловолокна»	Центробежное диспергирование	Подшихтованный базальт (SiO ₂ ~ 49%)	3–5
ОАО «ИВОТСТЕКЛО»	Раздув расплава вертикальной струей воздуха	Пироксеновый порфирит	1–3
ЗАО «Завод нестандартного оборудования и металлоизделий», торговая марка «IZOVOL»	Дуплекс-процесс	Базальт (SiO ₂ ~ 52%)	1–3
ООО «Машзавод БАСК»	Раздув расплава вертикальной струей воздуха	Базальт (SiO ₂ ~ 53%)	3–12

Элементный состав базальтового волокна различных производителей характеризуется незначительными вариациями концентраций петрогенных элементов. Исключением являются повышенные содержания магния и

железа в составе продукции ООО «Машзавод БАСК» и ОАО «Новгородский завод стекловолокна». Это может быть следствием повышенного содержания в исходном базальтовом сырье оливина.

Несмотря на обилие литературных данных, вопрос о стойкости базальтового волокна в агрессивной среде все еще остается открытым. Нами были изучены волокна четырех производителей на кислотную и щелочную стойкость (рис. 1). Для этого волокна помещали в растворы соляной кислоты и гидроксида натрия соответственно. Поддержание pH системы производили добавлением необходимых реактивов.



а) б)
Рис. 1. Изменение pH-раствора в зависимости от вида волокна при его испытании на щелочестойкость (а) и кислотостойкость (б).

Волокно № 1 – ОАО «Новгородский завод стекловолокна»; № 2 – ОАО «ИВОТСТЕКЛО»; № 3 – торговая марка «IZOVOL»; № 4 – ООО «Машзавод БАСК»

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что минимальной стойкостью обладают волокна ОАО «ИВОТСТЕКЛО» и ЗАО «Завод нестандартного оборудования и металлоизделий». Тогда как волокна производства ОАО «Новгородский завод стекловолокна» и ООО «Машзавод БАСК» характеризуются повышенной исходной щелочной и кислотной стойкостью.

Согласно литературным данным, в качестве микроармирующего компонента в цементных системах, рациональным является использование волокна с соотношением длины к диаметру более 10. Таким образом, по совокупности полученных данных, для дальнейших исследований по разработке цементобетона были взяты базальтовые волокна производства ООО «Машзавод «БАСК».

Для анализа щелочестойкости базальтового волокна в цементной системе, волокно помещали в смоделированную среду протекания гидратационных процессов. В качестве агрессивной среды использовали цементное молочко с pH 12,9 (табл. 2). В указанный раствор вводили распущенное волокно. Концентрацию базальтового волокна в растворе выбирали с учетом предельного содержания фибры в цементных композитах (3–12 % массы вяжущего), установленного на основании анализа литературных

данных. Концентрация составляла 7 %. Образцы подвергали выдержке при комнатной температуре в течение 7, 14, 28 и 72 сут.

Таблица 2

Результаты исследования щелочестойкости базальтового волокна

№	Время испытания, сут	Масса исходная, г	pH исх.	Масса после выдержки, г.	Потери при растворении, %	pH раствора после выдержки	Цвет волокна
1	7	4,87	12,9	4,22	13,4	11,5	норм
2	14	5,12	12,9	3,67	28,3	10,3	норм
3	28	5,06	12,9	3,49	30,9	10,12	слабо-осветл.
4	72	4,96	12,9	2,04	58,8	10,1	осветл.

После 28 сут выдержки в растворе потеря массы составляет около 30 %. Длительное хранение фибры (72 сут) в растворе приводит к потере массы до 50 %. Изложенные факты согласуются с результатами микроструктурных исследований базальтовых волокон (рис. 2). Имеющее место значительное выщелачивание исходных алюмосиликатных материалов после выдерживания в течение 28 сут в щелочной среде цементного молочка способствует появлению на поверхности характерных следов коррозии (рис. 2, б), что отрицательно сказывается на армирующей функции анизотропного компонента цементной матрицы.

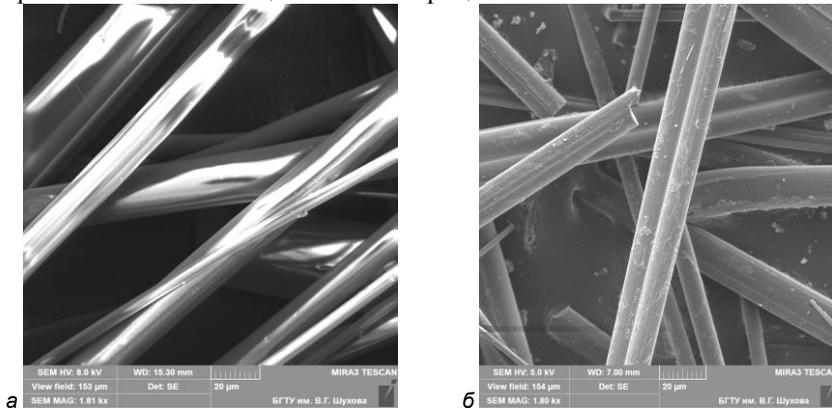


Рис. 2. Микроструктура базальтового волокна до (а) и после (б) выдерживания в щелочи¹

Необходимо отметить, что при эксплуатации базальтовой фибры в реальных условиях в бетоне, степень растворения волокна не будет столь значительной, так как процессы растворения будут затухать по мере схва-

¹ Исследования выполнены с помощью растрового электронного микроскопа с системой энергодисперсионного микроанализа Tescan в Центре высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

тывания и твердения цементного камня. Тем не менее, нельзя недооценивать химические процессы, протекающие в бетоне в период его эксплуатации, в которых участвует волокно. В связи с этим необходима разработка способа модификации волокна для повышения его стойкости в агрессивной щелочной среде.

В качестве рабочих гипотез повышения эффективности использования базальтового волокна в цементобетоне, были приняты: возможность увеличения щелочестойкости волокна термической обработкой; использование рационального способа введения волокна в бетонную смесь с учетом взаимодействий в системе «базальтовое волокно – пластификатор».

Для изучения влияния термообработки волокна на его свойства в работе предложена методика испытаний, согласно которой фибру подвергали нагреву в диапазоне температур от 300 до 700 °С с шагом 100 °С. Изотермическая выдержка составляла 30 мин. Охлаждение происходило при комнатной температуре в воздушной среде.

Далее образцы проходили испытание на щелочестойкость путем выдержки волокна в растворе цемента, приготовленном по ранее описанной методике, в течение 3, 7, 14 и 28 сут (рис. 3).

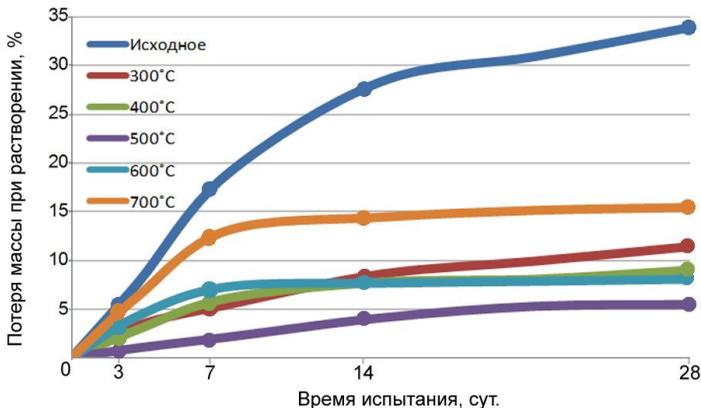


Рис. 3. Потеря массы волокна при растворении в зависимости от времени испытания

В результате установлено, что максимальной щелочестойкостью отличаются образцы, обработанные при температуре 500 °С. Потеря массы при выдержке в щелочном растворе после 28 сут в данном случае составляет около 5 %, тогда как исходное волокно за это время теряет более 30 % начальной массы волокна.

Для изучения процессов, протекающих в волокне при термической

обработке, были получены ИК-спектры² исходного и обработанного при температуре 500 °С волокна.

Сравнение ИК-спектров базальтового волокна до и после термической модификации показало видоизменение профилей полос поглощения (ПП) алюмосиликатных групп в области 1000–1300 см⁻¹ (рис. 4).

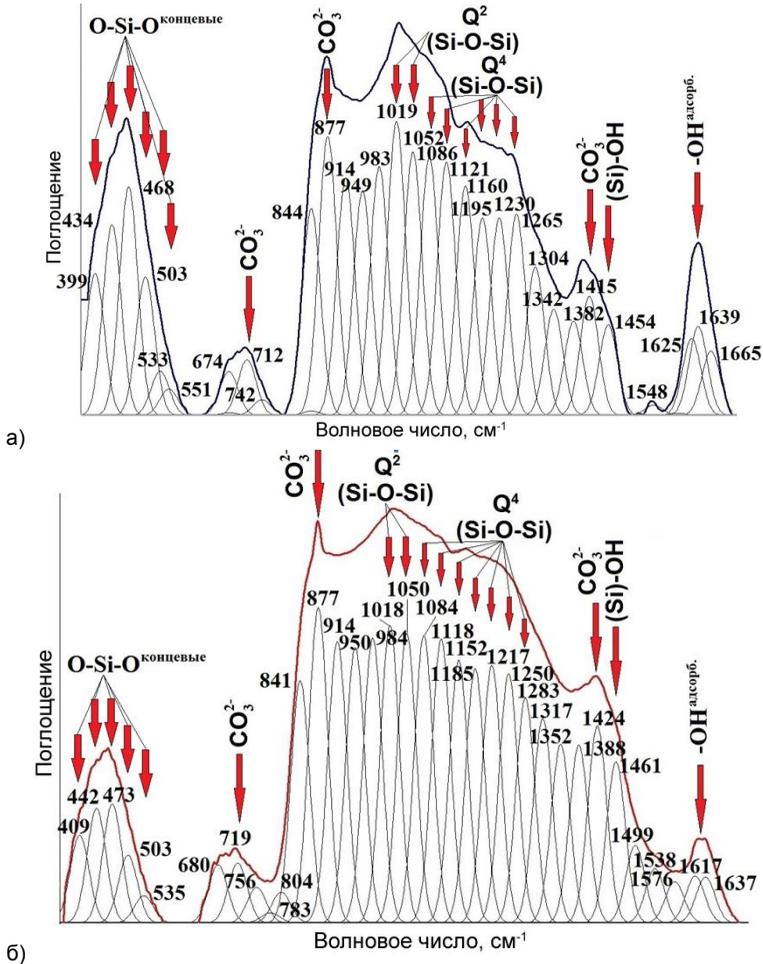


Рис. 4. Сравнительная диаграмма нормированных профилей ИК-спектров исходного (а) и термообработанного (б) волокна

² Исследования производили с помощью ИК-Фурье спектрометра VERTEX 70 фирмы Bruker Optics в научно-исследовательской лаборатории синтеза и исследований наносистем, ИК-спектроскопии и дисперсного анализа секции «Наносистемы в строительном материаловедении» (НСМ) БГТУ им. В.Г. Шухова.

В частности, обработка вызывает уменьшение интенсивностей полос поглощения 1019 и 1052 см^{-1} , характерных для валентных колебаний мостиковых связей Si-O-Si(Al) в цепочечных анионных группировках (Q^2) клинопироксенов. На фоне этого происходит рост интенсивностей полос каркасных структурных фрагментов (Q^4) в области волновых чисел 1084 – 1300 см^{-1} . Отмеченные обстоятельства свидетельствуют об увеличении степени полимеризации, так как повышение концентрации каркасных группировок (Q^4) происходит за счет уменьшения количества цепочечных фрагментов (Q^2). Благодаря этому происходит уплотнение структуры базальтового волокна. Кроме того, наблюдается увеличение количества кислотных брэндстедовских активных центров в два раза: с 78 мг-экв./г для исходного волокна до 150 мг-экв./г для термообработанного волокна.

Для создания локального структурного равновесия происходит перестройка алюмосиликатной матрицы стеклофазы в сторону увеличения степени полимеризации. Последнее обстоятельство способствует выносу двухвалентных катионов (в частности Ca и Mg) на поверхность, которые под действием CO_2 воздуха переходят в карбонаты, характерные полосы которых (1415 – 1424 ; 877 ; 712 – 719 см^{-1}) наблюдаются на ИК-спектрах. Увеличение интенсивностей этих спектральных линий в модифицированном волокне по сравнению с исходным является доказательством описанных процессов.

Описанный переход $\text{Q}^2 \rightarrow \text{Q}^4$ объясняет также уменьшение интенсивностей профилей спектральных линий в области 400 – 550 см^{-1} , которые отвечают за деформационные колебания концевых связей O-Si(Al)-O , количество которых в цепочечных анионах значительно больше, чем в каркасных структурах.

Таким образом, из проведенного анализа можно сделать вывод о перестройке алюмосиликатных структур в направлении увеличения степени полимеризации, что делает материал более стабильным и стойким к воздействию агрессивной среды.

Для изучения структурообразования цементного камня в присутствии базальтового волокна, были заформованы образцы цемента с волокном. Повышенное содержание волокна (12%) было обусловлено необходимостью создания условий для выявления возможных новообразований при условии взаимодействия базальтового волокна с клинкерными минералами.

Анализ рентгенограмм (рис. 5) образцов цементного камня с обработанным и исходным волокном, а также цементным камнем без добавки волокна, свидетельствует, что базальтовое волокно не оказывает существенного влияния на гидратацию клинкерных минералов. Изменение содержания портландита, как индикатора гидратации алита и возможных пуццолановых реакций, не выявлено.

чатая структура поверхности фибры (рис. 6, а), что является следствием протекающих коррозионных процессов. На термообработанном волокне поверхность достаточно гладкая, мало корродированная (рис. 6, б). При этом, необходимо отметить, что практически вся поверхность термически модифицированных волокон покрыта новообразованиями цементного камня, чего нельзя сказать об исходном волокне, новые фазы на которых имеются в небольшом количестве. Высокая адгезия продуктов гидратации цемента к микроармирующему компоненту значительно повышает прочность контактной зоны между фиброй и цементным камнем, что способствует повышению прочностных характеристик конечного материала. Таким образом, волокно, после обработки при 500 °С, выступает не в качестве химически активного компонента, а в качестве подложки при кристаллизации продуктов гидратации цемента.

Одной из рабочих гипотез работы было предположение о влиянии способа введения пластификатора и волокна на свойства конечного материала. В связи с этим в работе были рассмотрены три способа получения цементобетона: I – при котором все компоненты одновременно загружаются в смеситель; II – предварительное распределение волокна в воде затворения (распушение) в присутствии добавки с дальнейшим введением суспензии в формовочную смесь; III – распушение волокна в воде, с последующим смешением всех компонентом бетонной смеси, включая пластификатор.

Оптимальная дозировка пластификатора в системе выбиралась с учетом заданной подвижности смеси и составляла 0,8 и 0,28 % для пластификаторов СП-1 и Sika Vescro Crete соответственно.

Анализ полученных результатов (рис. 7) позволяет сделать вывод о существенном влиянии способа введения волокна и вида пластификатора на физико-механические свойства мелкозернистого бетона. Предварительное распушение волокна в воде затворения в присутствии нафталин-формальдегидного пластификатора (СП-1) (II способ) приводит к повышению прочности при сжатии на 24 % и при изгибе на 30 % по сравнению с составами, полученными одновременным смешением всех компонентов (I способ). Это обусловлено адсорбцией пластификатора на поверхности базальтового волокна и ее гидрофилизацией, что приводит к формированию сольватной оболочки на поверхности волокна и его равномерному распределению сначала в воде, а в последствии, в растворяющей смеси.

При использовании поликарбоксилатного пластификатора (SikaViscoCrete 125 Powder) наблюдается незначительное изменение прочностных характеристик бетона независимо от способа введения волокна. При этом использование нафталин-формальдегидной добавки (СП-1 производства Полипласт) позволяет увеличить прочность при сжатии на 10 % и при изгибе на 21 % по сравнению с составами на основе поликарбоксилатного пластификатора (SikaViscoCrete 125 Powder).

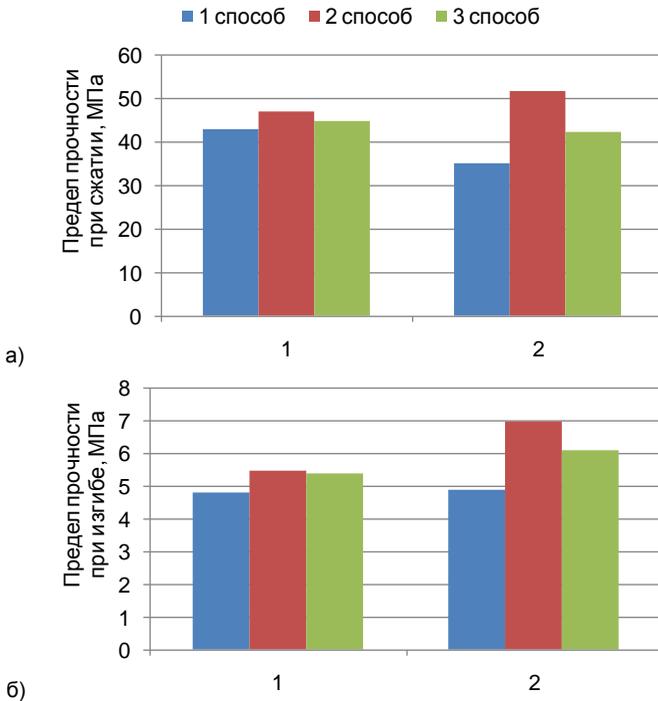


Рис. 7. Предел прочности при сжатии (а) и изгибе (б) в зависимости от способа введения волокна и вида пластификатора: 1 – Sika Vesco Crete; 2 – СП-1

В связи с этим в дальнейших экспериментах был принят II способ получения материала. В качестве пластификатора использовали пластификатор СП-1.

Для установления рациональных составов мелкозернистого бетона была разработана матрица планирования. Выбор факторов и параметров оптимизации производили исходя из технологической и экономической целесообразности.

После статистической компьютерной обработки экспериментальных данных были получены математические модели изменения предела прочности при сжатии и изгибе от количества цемента, пластификатора и волокна. По уравнениям регрессии был сделан анализ влияния исследуемых факторов на физико-механические свойства (рис. 8).

Установлено существенное влияние концентрации волокна в системе на прочностные характеристики бетонов. В частности, увеличение содержания волокна с 5 до 7 % способствует росту прочности при сжатии с 50 до 57 МПа (на 12 %). Дальнейшее увеличение волокна в системе не целесообразно, поскольку приводит к снижению прочности. При этом прирост прочности при сжатии для составов с содержанием волокна равным 7 % по

сравнению с контрольными составами составляет 25 %, а в сравнении с образцами с использованием исходного волокна без термообработки составляет 11 %.

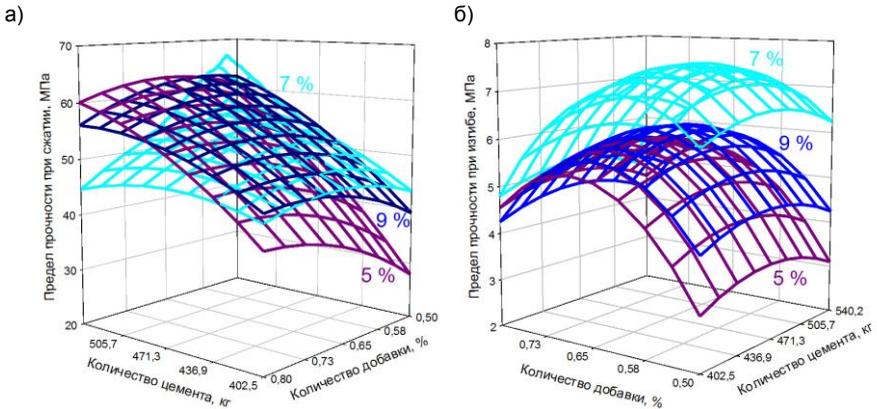


Рис. 8. Зависимости прочностных характеристик мелкозернистого цементобетона от количества цемента, пластификатора и термообработанного волокна:
а – предел прочности при сжатии; б – предел прочности при изгибе

Отмечены особенности зависимости прочности при изгибе от количества цемента, добавки и базальтового волокна (рис. 8, б). Так, максимальная прочность наблюдается на составах с использованием 7 % волокна и 0,8 % пластификатора. Отмечается рост прочности по сравнению с контрольными составами в 1,5 раза, а прирост прочности в сравнении с образцами с использованием исходного волокна без термообработки составляет 9 %. При этом, так же стоит учитывать установленную высокую щелочестойкость термообработанного базальтового волокна при расчете долговечных конструкций мелкозернистого цементобетона, тогда как исходное волокно будет иметь значительную степень растворения в процессе эксплуатации. Для всех составов рекомендуется использовать содержание цемента равным 480 кг/м^3 . В этом случае разрабатываемые материалы характеризуются необходимой прочностью при сжатии и изгибе без перерасхода связующего компонента.

На основе результатов проведенных исследований получены эмпирические зависимости физико-механических характеристик мелкозернистого бетона от количества термообработанного базальтового волокна, пластификатора и цемента. Разработаны номограммы (рис. 9), которые позволяют решать задачи подбора состава мелкозернистого цементобетона, микроармированного базальтовым волокном, как для строительства конструктивных слоев дорожных одежд, так и для использования в промышленном и гражданском строительстве.

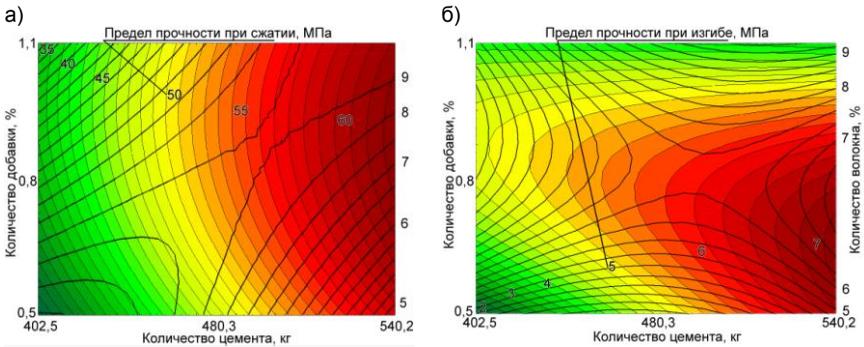


Рис. 9. Номограммы по определению количества сырьевых компонентов для получения мелкозернистого цементобетона заданного класса прочности: а – предел прочности при сжатии; б – предел прочности при изгибе

Таким образом, разработаны составы мелкозернистого бетона для дорожного строительства с использованием термообработанного базальтового волокна, позволяющие получать материалы с классом В25–В60 по прочности при сжатии и В_{тб}2,8–В_{тб}6,0 по прочности при изгибе, морозостойкостью не менее F300 для верхнего и нижнего слоев покрытий автомобильных дорог I–IV категории.

В результате расчета дорожной одежды для автомобильной категории I категории шириной 8,5 м по двум вариантам, было установлено, что использование предлагаемого материала позволяет снизить толщину слоя покрытия с 24 до 18 см, имея при этом запас прочности 18 %. Это обусловлено тем, что использование микроармирующего компонента позволяет повысить класс прочности бетона с В42,5 до В60 в случае прочности при сжатии и с В_{тб}4,0 до В_{тб}6,0 при прочности при изгибе, а так же класс морозостойкости с F200 до F300.

Для определения распределения демпфирующей нагрузки по слоям дорожной одежды, методом конечных элементов был произведен расчет двух конструкций: с традиционным покрытием мелкозернистого бетона и покрытием из цементобетона, микроармированного базальтовым волокном. Математическое моделирование позволяет оценить величину прогиба под действием динамической нагрузки от подвижного автотранспорта. В результате расчета установлено, что в точке максимально приложенной нагрузки величина прогиба из разработанного материала составляет 2 мм, тогда как при использовании традиционного покрытия прогиб составляет 6 мм. Таким образом, за счет отражающего воздействия динамической нагрузки, удается снизить пластические деформации в подстилающем слое, что значительно улучшает технико-эксплуатационные характеристики цементобетона.

Для апробации полученных результатов выпущена опытная партия бетонной смеси с использованием термообработанного базальтового во-

локна. Разработанный материал использовался в устройстве покрытия конусов при капитальном ремонте моста протяженностью 36 м на км 4+000 автодороги «Борисовка – Хотмыжск – Никитское» Борисовского р-на Белгородской обл.

Экономическая эффективность внедрения разработанного мелкозернистого цементобетона с использованием термообработанного базальтового волокна при строительстве автомобильных дорог обусловлена сокращением толщины слоя покрытия за счет повышения прочностных характеристик бетона. Существенный запас прочности разработанного мелкозернистого бетона, позволит повысить долговечность покрытия и увеличить межремонтные сроки эксплуатации автомобильной дороги.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предложен принцип повышения эффективности мелкозернистого цементобетона, микроармированного базальтовой фиброй, заключающийся в повышении щелочестойкости базальтового волокна путем его термической обработки при 500 °С. Выявлен характер зависимости свойств цементобетона от способа введения термообработанного волокна и вида пластификатора. Наиболее эффективным является предварительное распушение волокна в воде затворения в присутствии нафталин-формальдегидного суперпластификатора с дальнейшим введением суспензии в формовочную смесь. Адсорбция пластификатора на поверхности фибры приводит к гидрофилизации ее поверхности, что способствует равномерному распределению волокна по объему смеси и, как следствие, повышению прочности бетона. Использование нафталин-формальдегидной добавки (СП-1 производства Полипласт) позволяет увеличить прочность при сжатии на 10% и при изгибе на 21 % по сравнению с составами на основе поликарбоксилатного пластификатора (SikaViscoCrete 125 Powder).

2. Обоснована целесообразность термической обработки базальтового волокна при температуре 500 °С с последующим охлаждением в воздушной среде при комнатной температуре для повышения его щелочной стойкости. Предложена феноменологическая модель модификации базальтового волокна при термической обработке, основанная на переходе Fe^{2+} в Fe^{3+} в пироксеновой фазе стекла в окислительных условиях. Происходящая при этом смена координационного окружения Fe^{VI} в Fe^{IV} инициирует образование связей между $(Si_2O_6)^{4-}$ -цепями и их трансформацию в каркасный структурный тип $[(Fe^{+3}, Si_2)O_6]^{-1}$ с образованием железосодержащих плагиоклазовых фаз. Увеличение количества кислотных брэнстедовских центров в два раза и интенсивности полос поглощения мостиковых связей Si–O–Si в области волновых чисел 1200 см^{-1} , соответствующих каркасным структурным фрагментам (Q^4), происходит за счет уменьшения количества цепочечных фрагментов (Q^2) и свидетельствует о повышении степени по-

лимеризации анионного компонента при термообработке. Данные процессы приводят к уплотнению структуры фибры и способствуют повышению ее щелочестойкости, что подтверждается морфоструктурными особенностями поверхности термообработанного базальтового волокна, выдержанного в цементном растворе.

3. Установлены особенности структурообразования мелкозернистого цементобетона при использовании термически обработанного базальтового волокна в качестве микроармирующего компонента. Образование в поверхностном слое Si–ОН-связей объясняет формирование на поверхности волокна сетки из новообразованного вещества, которое, судя по его морфологии и размерам, обладает скрытокристаллической структурой. Модифицированное волокно выступает в качестве подложки для кристаллизации продуктов гидратации клинкерных минералов и имеет более высокую адгезию, чем необработанное волокно, за счет развитой поверхности и химического сродства с цементной системой. Сформированная на поверхности волокна плотная оболочка из новообразований препятствует дальнейшему взаимодействию волокна с активными компонентами цементного камня при эксплуатации.

4. Разработаны составы мелкозернистого бетона с использованием термообработанного базальтового волокна, позволяющие получать материалы с классом В25–В60 по прочности при сжатии и $B_{тв}2,8$ – $B_{тв}6,0$ по прочности при изгибе, морозостойкостью не менее F300 для верхнего и нижнего слоев покрытий автомобильных дорог I–IV категорий. Построены номограммы по определению необходимого количества базальтового волокна, цемента и пластификатора для получения заданного класса прочности мелкозернистого бетона.

5. Произведен расчет конструкции дорожной одежды с использованием мелкозернистого цементобетона для II категории автомобильных дорог. Предложена модель распределения демпфирующей нагрузки от колесного транспорта в слоях дорожной одежды в зависимости от применения разработанного бетона в слое покрытия автомобильных дорог.

6. Для внедрения результатов работы при строительстве, ремонте и реконструкции автомобильных дорог разработаны следующие технические документы: стандарт организации СТО 02066339-003-2012 «Мелкозернистый цементобетон армированный базальтовыми волокнами»; рекомендации по использованию термообработанного базальтового волокна при производстве цементобетона для дорожного строительства; технологический регламент на производство мелкозернистого бетона с использованием термообработанного базальтового волокна для дорожного строительства.

7. Для апробации полученных результатов выпущена опытная партия бетонной смеси с использованием термообработанного базальтового волокна. Разработанный материал использовался в устройстве покрытия

конусов при капитальном ремонте моста протяженностью 36 м на км 4+000 автодороги «Борисовка – Хотмыжск – Никитское» Борисовского района, Белгородской обл.

Экономическая эффективность внедрения разработанного мелкозернистого цементобетона с использованием термообработанного базальтового волокна при строительстве автомобильных дорог обусловлена сокращением толщины слоя покрытия за счет повышения прочностных характеристик бетона. Существенный запас прочности разработанного мелкозернистого бетона, позволит повысить долговечность покрытия и увеличить межремонтные сроки эксплуатации автомобильной дороги.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Карацупа, С.В.* Предпосылки использования базальтового волокна при производстве строительных материалов [Электрон. ресурс] / С.В. Карацупа, Г.Г. Ильинская, **В.Б. Бабаев** // Научно-техническая конференция институтов и факультетов, Белгород, 22–25 октября 2008 г. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2008.

2. *Карацупа, С.В.* Базальтовые волокна как армирующий материал для бетона [Текст] / С.В. Карацупа, **В.Б. Бабаев**, // Материалы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве SIB–2008», Воронеж, 10–15 ноября 2008 г. / том 1 Современные проблемы строительного материаловедения и технологии / книга 1 / ВГАСУ. – Воронеж, 2008. – С. 293–298.

3. *Бабаев, В.Б.* Модифицированный на нано- и микроуровне цементнофибробетон для дорожного строительства / **В.Б. Бабаев** // Международный семинар-конкурс молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей, Москва, 27–28 октября 2010 г. – Москва, 2010. – С. 7–8.

4. *Бабаев, В.Б.* Рассмотрение возможности использования в качестве микроармирующего компонента в дорожном цементобетоне базальтового волокна / **В.Б. Бабаев**, А.В. Кнотько, А.В. Гаршев // Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения): материалы Международной научно-практической конференции, Белгород, 1–3 марта 2011 г. – Белгород, 2011. – Ч. 4. – С. 25–27.

5. *Бабаев, В.Б.* Базальтовое волокно как компонент для микроармирования цементных композитов [Текст] / **В.Б. Бабаев**, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 4. – С. 58–61.

6. *Бабаев, В.Б.* К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе [Текст] / **В.Б. Бабаев**, В.В. Строкова, В.В. Нелюбова,

Н.Л. Савгир // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 2. – С. 63–66.

7. *Бабаев, В.Б.* Коррозионная стойкость базальтового волокна в цементном растворе [Текст] / **В.Б. Бабаев**, Н.Л. Савгир // Сборник научных трудов по материалам 1-ой Международной научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона», Саратов, 19–21 Апреля 2013. – Саратов, 2013. – С. 132–138.

8. Ноу-хау № 20110011 «Цементо-фибробетон для дорожного строительства» / В.В. Строкова, **В.Б. Бабаев**: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Белгор. гос. технол. унив-т им. В.Г. Шухова. Дата регистр. 01.09.2011 г. Срок охраны: 5 лет.

БАБАЕВ Виктор Борисович

**МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ ЦЕМЕНТОБЕТОН
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА
ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Подписано в печать 30.04.13. Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом
университете им. В.Г. Шухова.
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.