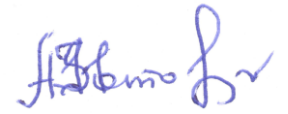


На правах рукописи



Зотов Александр Николаевич

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ**

05.23.05 - Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иваново – 2017

Работа выполнена на кафедре «Технология, организация и экономика строительства» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Костромская государственная сельскохозяйственная академия»

Научный руководитель:

Соболев Геннадий Михайлович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Костромская государственная
сельскохозяйственная академия»,
профессор кафедры «Технология, организация
и экономика строительства»

Официальные оппоненты:

Лесовик Валерий Станиславович
член-корреспондент РААСН,
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова»,
заведующий кафедрой «Строительное
материаловедение, изделия и конструкции»

Христофорова Ирина Александровна
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Владимирский государственный
университет им. А.Г. И Н.Г. Столетовых»,
профессор кафедры «Химические технологии»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

Защита состоится 22 декабря 2017 г. в 12-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» (www.ivgpi.com).

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
Кандидат технических наук, доцент

Н.В. Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время огромный интерес проявляется к способам модифицирования мелкозернистых бетонов и улучшению их свойств. Научные исследования, опыт производственного применения и анализ недостатков мелкозернистого бетона показывают, что совершенствование его показателей качества сводится к введению микронаполнителей, полифункциональных химических добавок и дисперсного армирования. Однако, взаимодействие модифицирующих компонентов и их совместное влияние на формирование свойств бетона на микро- и макроуровнях исследованы недостаточно.

В связи с этим, изучение данных процессов позволит решить вопросы оптимизации составов и технологии получения модифицированных мелкозернистых фибробетонов с высокими эксплуатационными характеристиками, что весьма актуально, поскольку рациональной областью применения таких композитов являются дорожные, мостовые, гидротехнические и военные сооружения и конструкции, работающие в агрессивных средах и в суровых климатических условиях, а также ремонтные и инъекционные смеси.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с тематическим планом научно - исследовательских работ ФГБОУ ВО Костромской ГСХА.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам изучения и совершенствования свойств фибробетонов посвящены многочисленные работы российских и зарубежных ученых. Имеется большой опыт эффективного применения фибры при выполнении строительных работ и производстве фибробетонных изделий.

Однако, все разработки и исследования дисперсно-армированных бетонов с синтетическими волокнами на сегодняшний день основаны лишь на фундаментальных знаниях, которые получены в результате изучения технологических процессов изготовления, расчетов и проектирования конструкций из стале- и стеклофибробетона. Вопросы изучения механизмов взаимодействия компонентов смеси, теории расчета составов, технологии производства и прогнозирования свойств модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй по-прежнему остаются открытыми.

Научная гипотеза

Взаимодействие микрокремнезема, гиперпластификатора и низко модульной полипропиленовой фибры в оптимальных дозировках позволяет увеличить седиментационную устойчивость цементной системы, регулировать технологические свойства смеси и значительно повысить прочностные, деформационные и эксплуатационные показатели качества мелкозернистого бетона за счет формирования более плотной и слитной структуры полиморфными модификациями оксида кремния и новообразованиями.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является разработка модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй, исследование структуры и прогнозирование их физико – механических и эксплуатационных свойств.

В связи с этим основными задачами научной работы являются:

- исследование механизмов совместного влияния микронаполнителя, химической добавки и дисперсного армирования на технологические, прочностные и эксплуатационные свойства мелкозернистых бетонов;
- разработка методик подбора составов и развитие технологии изготовления модифицированного мелкозернистого фибробетона с заданными показателями качества;
- получение оптимизированных составов и прогнозирование свойств модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй;
- разработка рекомендаций по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных изделий и конструкций;
- апробация разработанных составов, производственные испытания изделий и оценка их технико - экономической эффективности.

Научная новизна

1. Исследовано взаимодействие модификаторов в составе мелкозернистого бетона и установлено их влияние на формирование структуры, процессы твердения и усадочные деформации в условиях квазистатической сушки.

2. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность значительного повышения прочности и трещиностойкости фибробетона за счет термической обработки фибры, способствующей деформированию волокон, ускорению

гидролиза и экстракции аппретов с их поверхности.

3. Разработаны многофакторные математические модели расчета и прогнозирования технологических, прочностных и эксплуатационных свойств модифицированного мелкозернистого фибробетона при разных соотношениях песка и цемента (П/Ц) и с учетом структурных характеристик S и W .

4. Установлены оптимальные соотношения модифицирующих компонентов для достижения максимальных показателей прочности, морозостойкости и водонепроницаемости мелкозернистого бетона.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методик проектирования составов модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй и прогнозировании их свойств при помощи многофакторных зависимостей, полученных методами математического планировании эксперимента. Подтверждена возможность получения высокопрочного мелкозернистого фибробетона с низко модульными волокнами.

Практическая значимость заключается в том, что:

- разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй марок по удобоукладываемости Ж1-Ж3 и П1-П5, прочностью при сжатии до 84 МПа, прочностью на растяжение при изгибе до 7,5 МПа, морозостойкостью 600 циклов и водонепроницаемостью $18 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$;
- техническая новизна исследований подтверждается выдачей патента на изобретение РФ с № 2583965 С1 «Состав фибробетона» от 06.11.2014;
- произведены радиологические исследования модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй спектрометрическим методом и установлено соответствие полученных данных санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к строительным материалам;
- разработаны «Рекомендации по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных изделий и конструкций»;
- разработан «Технологический регламент на производство модифицированных мелкозернистых фибробетонных смесей для дорожных изделий» для ОАО «Костромской силикатный завод»;

- осуществлено внедрение результатов исследований на предприятии ОАО «Костромской силикатный завод» (г. Кострома) при изготовлении тротуарной плитки в объеме 200 м² и бордюрных камней в количестве 780 шт;

- произведены испытания и оценка эксплуатационных свойств изделий из ММФБ, результаты которых отражены в научно – практическая работа «Исследование свойств и испытание дорожных изделий и конструкций из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй».

Методология и методы исследования

Теоретические исследования основаны на анализе и систематизации научно-технической литературы и методах математического планирования эксперимента. Эксперименты и испытания образцов проводились на лабораторном оборудовании с использованием стандартных методик и современной измерительной аппаратуры. Обработка полученных результатов производилась математико – статистическими методами при помощи ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований взаимодействия микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры и их влияния на формирование структуры и свойства модифицированного мелкозернистого фибробетона;

- результаты исследований термообработанной полипропиленовой фибры и ее влияния на прочность и трещиностойкость мелкозернистого бетона;

- результаты исследований микроструктуры, процессов структурообразования, кинетики набора прочности и усадочных деформаций модифицированных фибробетонов в условиях квазистатической сушки;

- математические модели технологических, прочностных и эксплуатационных свойств модифицированных мелкозернистых фибробетонов при разных соотношениях П/Ц и с учетом структурных характеристик С и W;

- результаты опытно - промышленного внедрения составов модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов научных исследований и выводов подтверждена достаточным объемом экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях и подтвержденных апробацией на производстве.

Основные положения диссертационной работы докладывались на XVIII научно – методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций» (СПб, ВИТУ (ВИИТ), 2014 г.); Студенческой научно – практической конференции СНК 2014 «Актуальные вопросы строительства и архитектуры (Кострома, КГСХА, 2014 г.); Международной научно – практической конференции «Технические науки: теория, методология и практика» (Москва, 2014 г.); II научной конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов «Актуальные вопросы строительства и архитектуры» и 66-й международной научно – практической конференции «Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе» (Кострома, КГСХА, 2015 г.); IV Международной заочной научно – практической конференции «Техника и технологии: роль в развитии современного общества» (Краснодар, 2015 г.); VII Международной заочной научно–практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» (Екатеринбург, 2015 г.) XV Международной научно – практической конференции «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2015 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 13 научных работ, 2 из которых в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, получен 1 патент.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка использованных источников из 135 наименований, приложений; изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 31 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Мелкозернистый бетон находит всё более широкое применение в дорожном строительстве - при устройстве монолитных откосов, покрытий и оснований под автомобильные дороги и при изготовлении различных конструкций и изделий.

К преимуществам мелкозернистого бетона можно отнести хорошую удобоукладываемость и формуемость, что важно так же при изготовлении тонкостенных и густоармированных конструкций. Отсутствие крупного заполнителя обеспечивает высокую однородность структуры композита, что расширяет область его применения от составов литых смесей для наливных полов и монолитных конструкций до жестких смесей для вибропрессованных изделий.

При использовании в составе вяжущего различных тонкодисперсных добавок, активно влияющих на процессы гидратации и формирование структуры цементного камня, появляется возможность экономить цемент, улучшать эксплуатационные качества бетонов, решать проблемы ресурсосбережения и переработки производственных отходов. Применение химических добавок на основе эфиров поликарбоксилатов позволяет получать высокопрочные композиты с минимальным водоцементным отношением, сохранять заданную консистенцию смеси и осуществлять бетонирование конструкций при помощи бетононасосов при минимальных трудозатратах. Дисперсное армирование положительно влияет на формирование структуры цементного камня, препятствует усадочным деформациям и повышает трещиностойкость бетона.

В исследованиях использовались следующие материалы:

Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, произведенный ЗАО «Белгородский цемент», г. Белгород. Физико-механические свойства цемента: прочность при сжатии в возрасте 28 суток - $61,0 \pm 0,5$ МПа, $\rho_{\text{ист}} = 3101$ кг/м³, удельная поверхность 330 м²/кг, нормальная густота 25,25 %. Химико-минералогический состав клинкера: C₃S – 61,5 %, C₂S – 15,9 %, C₃A – 7 %, C₄AF – 13 %.

Микрокремнезем конденсированный уплотненный МКУ-85, произведенный ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк, рассматривался в качестве высокоактивной минеральной добавки. Основные свойства МК: $\rho_{\text{нас}}=400-600$ кг/м³, $\rho_{\text{ист}}=2200$ кг/м³, удельная поверхность 18-25 м²/г, водопотребность $V_{\text{МК}}=85$ %. Химический состав представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав микрокремнезема МКУ-85

Содержание компонентов, %									
SiO ₂	H ₂ O	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₃	Fe ₂ O ₃	ппп
93,8	0,1	0,81	0,68	1,6	0,44	0,41	0,41	1,3	0,45

Песок крупный природный 1 класса ОАО «Хромцовский карьер», с. Хромцово, Ивановской области. Основные характеристики: $\rho_{\text{нас}}=1620$ кг/м³, $\rho_{\text{ист}}=2626$ кг/м³, пустотность П=38,3 %, модуль крупности $M_k=2,73$, водопотребность $V_{\text{П}}=6$ %.

Гиперпластификатор Stachement 2061/151.2 - жидкая химическая добавка, произведенная ЗАО «Стахема-Волга», г. Тольятти, следующего состава: вода – 70%, поликарбоксилатер – 18%, глюконат натриевый – 12%. Плотность добавки 1097 ± 10

кг/м³, концентрация добавки $30 \pm 1,5\%$, водородный показатель рН = $5 \div 8$.

Фибра полипропиленовая мультифиламентная длиной 6 - 18 мм и диаметром 20 мкм, изготовленная ООО «ФибраЛюкс», Ленинградская область, г. Коммунар. Основные свойства: $\rho_{\text{ист}}=910$ кг/м³, модуль упругости – 3500-3900 МПа, прочность на растяжение 240 МПа, поверхность обработана замасливателем 4С (аминосилан).

Ключевым вопросом в получении мелкозернистого фибробетона высокого качества является эффективность диспергирования модифицирующих компонентов. Равномерность распределения микрокремнезема в сухой или влажной смеси достигается тщательным перемешиванием с цементом и песком. При этом частицы МК и песка, обладая более высокой твердостью (7 баллов по шкале Мооса) и прочностью, при скоростном смешивании выполняют роль абразивных мелющих тел. При увлажнении смеси вода интенсивно взаимодействует с цементом, на поверхности которых образуются первичные продукты гидратации, вследствие чего происходит аморфизация и дополнительное диспергирование поверхностного слоя, который легко сдирается частицами песка и МК, и образует фракцию высокоактивных частиц нанодисперсного размера.

Гиперпластификатор за счет электростатического и стерического эффектов, достигнутых с помощью гидрофобных полиэфирных цепей молекулы поликарбоксилата, диспергирует частицы цемента, образует на их поверхности и гидратных новообразованиях мономолекулярный адсорбционный слой, который увеличивает седиментационную устойчивость цементной системы.

«Распушение» и равномерное распределение фибры по всему объему бетона обеспечивается химическими реакциями воды и замасливающих препаратов, которыми обработаны волокна. При гидратации вяжущего на поверхности волокон опережающим темпом формируются новообразования, приводящие к уплотнению контактной зоны с цементным камнем и улучшению их анкеровки.

Таким образом, взаимодействие модифицирующих компонентов позволяет значительно улучшить цементную матрицу на всех уровнях структуры и сформировать композит с уникальными показателями качества.

Особенности формирования структуры и кинетика набора прочности модифицированных мелкозернистых бетонов и фибробетонов были исследованы на 4-х составах равноподвижных смесей с П/Ц=3, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Составы обычных и модифицированных фибробетонных смесей

№	Ц, кг	МК, кг	П, кг	Ф _{ПП} , кг	ГП, % от МКВ	В, дм ³	В/В	ρ _{см} , кг/м ³
1	500	-	1500	-	-	225	0,45	2323,8
2	460	40	1500	-	-	248	0,496	2280,4
3	460	40	1500	-	0,75	145	0,308	2412,9
4	460	40	1500	0,9	0,75	145	0,308	2411,2

Сроки схватывания и начала набора прочности определялись по скорости прохождения ультразвука в образцах - кубах с ребром 200 мм при помощи прибора УК-14 П в 1-е сутки твердения и на протяжении 28-и суток; кинетика набора прочности бетонов и фибробетонов проанализирована по результатам периодических испытаний образцов при сжатии за аналогичный период твердения (рис. 1).

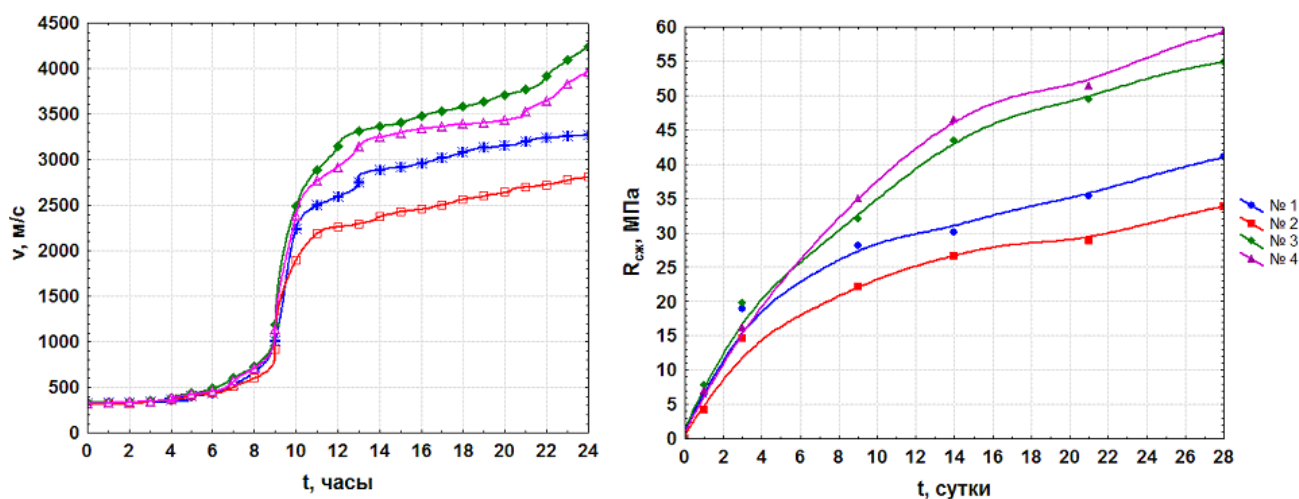


Рис. 1. - Изменение скорости прохождения ультразвука и прочности образцов в 1-е сутки и в течение 28-и суток твердения

При анализе графиков установлено, что в начальные сроки твердения (1 - 5 часов) скорость прохождения ультразвука меняется незначительно у составов № 1; 3 и 4, у состава № 2 ее снижение с 8-го по 9-й часы объясняется менее активным структурообразованием вследствие действия примесей микрокремнезема, влияющих на рН среды. Интенсивное упрочнение структуры наблюдается с 8-го по 10-й часы, после 12-и часов скорость набора прочности стабилизируется. В составах с В/В=0,308 на 28-е сутки скорость распространения волн на 20 % выше, чем в образцах с В/В=0,496, что обусловлено изменением плотности композита.

Набор прочности в течение первых 3-х суток твердения во всех составах изменяется незначительно, после 5-и суток твердения в составе № 4 отмечен динамичный рост прочностных показателей. На 28-е сутки прочность при сжатии образцов на 8 % больше, чем у образца № 3, и в 1,5 раза выше контрольного № 1. Это

объясняется проявлением пуццолановой активности микрокремнезема, ростом новообразований и более глубокой гидратацией вяжущего за счет миграции молекул воды через адсорбционные оболочки, образованные молекулами гиперпластификатора.

Исследование и измерение деформаций усадки проводились по методике Шейкина А.Е. на образцах с размерами 40*40*160 мм, которые выдерживались в течение 28 суток на приборе при относительной влажности воздуха менее 60 % в условиях квазистатической сушки, и при термическом воздействии на образцы - охлаждение до -18 °С и нагрев до +125 °С (рис. 2).

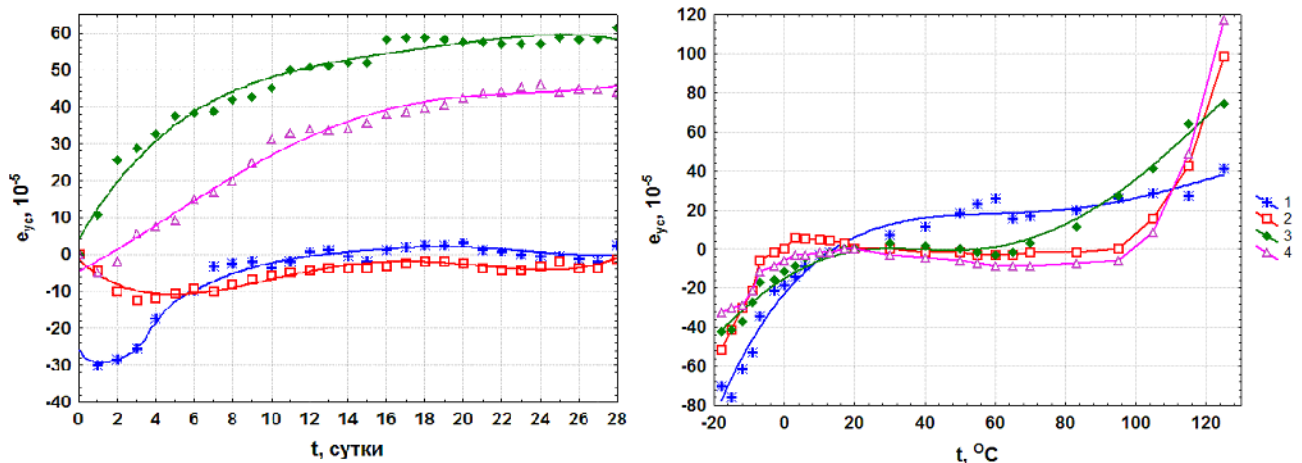


Рис. 2. - Деформации усадки при квазистатической сушке в течение 28-и суток твердения и температурные деформации образцов

Анализ графиков показывает, что к концу 1-х суток твердения нестабильную усадку имеют образцы № 1 и № 3. До 10-х суток твердения во всех составах наблюдается изменение усадки и появление необратимой части деформации, составляющей 30 - 60 % от величины общей усадки. Это объясняется появлением дополнительных структурных связей в цементном геле за счет уплотнения частиц при высушивании и действии внутренних растягивающих напряжений при формировании новообразований. После 16-и суток твердения усадочные деформации образцов стабилизируются и не превышают 10 %, что объясняется появлением новообразований с различными кристаллическими структурами и энергиями связи молекул адсорбированной воды на их поверхности.

По результатам изучения температурных деформаций образцов можно сделать вывод, что модифицированные бетоны (составы № 2, 3 и 4) имеют меньшие усадочные деформации в диапазоне от -20 °С до +90 °С, по сравнению с контрольным составом. При -20 °С величина относительных деформаций усадки у состава №1 в 2 раза выше, чем у состава № 2. В диапазоне температур от +5 °С до +85 °С (в составах № 2 и № 4)

усадочные деформации близки к нулю, что объясняется препятствием деформаций сжатия-растяжения за счет взаимодействия микрокремнезема и волокон.

Также определено, что взаимодействие модификаторов влияет на коэффициент линейной температурной деформации композита, и в пределах от +125 °С до +20 °С и от +20 °С до -18 °С он будет разным. Очевидно, что изменение температурных деформаций усадки фибробетона вызвано температурным расширением и теплофизическими свойствами модифицирующих компонентов.

Микроскопические исследования образцов (составы № 1 и № 4) в возрасте 28 суток нормального твердения выявили видимые дефекты структуры в виде мелких каверн, образованных вследствие воздухововлечения в смеси (рис. 3). При увеличении в 500 раз структура модифицированного мелкозернистого фибробетона представляется более однородной и слитной. Стекловидность материала обусловлена наличием диоксида кремния полиморфных модификаций и новообразований, состав которых сформирован за счет протекания экзотермических химических реакций в процессе твердения.

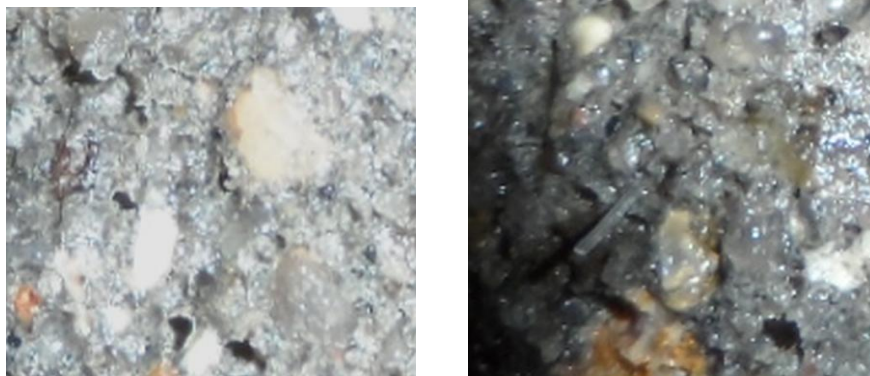


Рис. 3. - Микроструктура обычного бетона и модифицированного фибробетона (x500)

Исследование и сравнение процессов фазообразования в системе «цемент - микрокремнезем» в интервале температур 20—1100 °С проводились по результатам рентгенофазовых анализов (РФА) гидратированных смесей простого вяжущего (Ц=100 %; В/Ц=0,25) и модифицированного (Ц = 92 %, МК = 8 %, ГП = 0,5 % от общей массы вяжущего; В/Ц=0,165) на 28-е сутки твердения и последующего обжига с выдержкой 3 часа. Дифрактограммы цементного камня из обычного и модифицированного вяжущих и их минералогические составы представлены на рисунке 4.

Минералогический состав цементного камня без добавок представлен алюминаткальциевыми кристаллогидратами и несвязанными в гидраты моноалюминатом кальция, диалюминатом кальция и α -Al₂O₃.

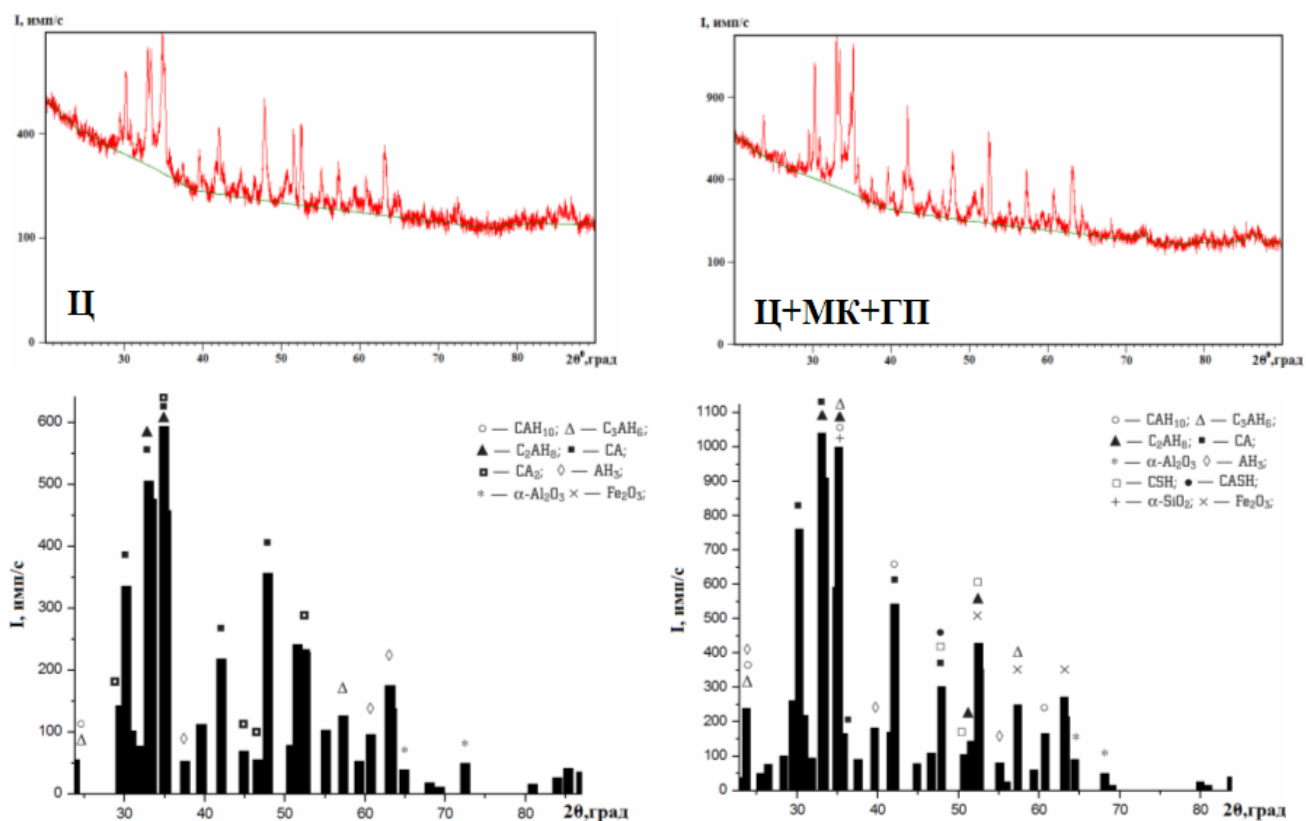


Рис. 4. – Дифрактограммы и минералогические составы цементного камня из обычного и модифицированного вяжущего

В составе модифицированного вяжущего (Ц+МК+ГП) отмечено снижение интенсивности дифракционных максимумов CA при одновременном увеличении количества пиков алюмогеля и кристаллогидратов, что обусловлено изменением процессов гидратации цемента в присутствии микрокремнезема. Наличие МК в составе вяжущего определяет интенсивное образование структур низкоосновных гидросиликатов кальция и появление пиков α -кварца низкой интенсивности.

Уплотнение структуры композита за счет формирования новообразований и кристаллических сростков на границе раздела фаз вследствие более глубокой гидратации вяжущего позволяет улучшить механическое сцепление и анкеровку полипропиленовой фибры. Однако, вследствие неполярных свойств полипропилена и отсутствия межмолекулярных связей, все синтетические волокна имеют слабую смачиваемость и плохую адгезию к цементному камню.

Предпосылкой поиска способов улучшения контактной зоны стала выдвинутая гипотеза о возможности повышения анкеруемости полипропиленовой фибры путем термической обработки ее поверхности, способствующей деформированию волокон, ускорению гидролиза и экстракции аппретов с их поверхности. При испытаниях образцов мелкозернистого фибробетона с $\text{П/Ц} = 3$, $\text{В/Ц} = 0,43$ и $\Phi_{\text{ПП}} = 0 \div 3 \text{ кг/м}^3$

установлено, что введение термообработанных волокон позволило увеличить прочность фибробетона при сжатии до 12%, на растяжение при изгибе – до 10 %; значения условного критического коэффициента интенсивности напряжения K_{c}^* выше в 1,9 раза по сравнению с контрольным составом, а сопротивление разрушающей нагрузке образцов при этом возрастает до 90 % (рис. 5).

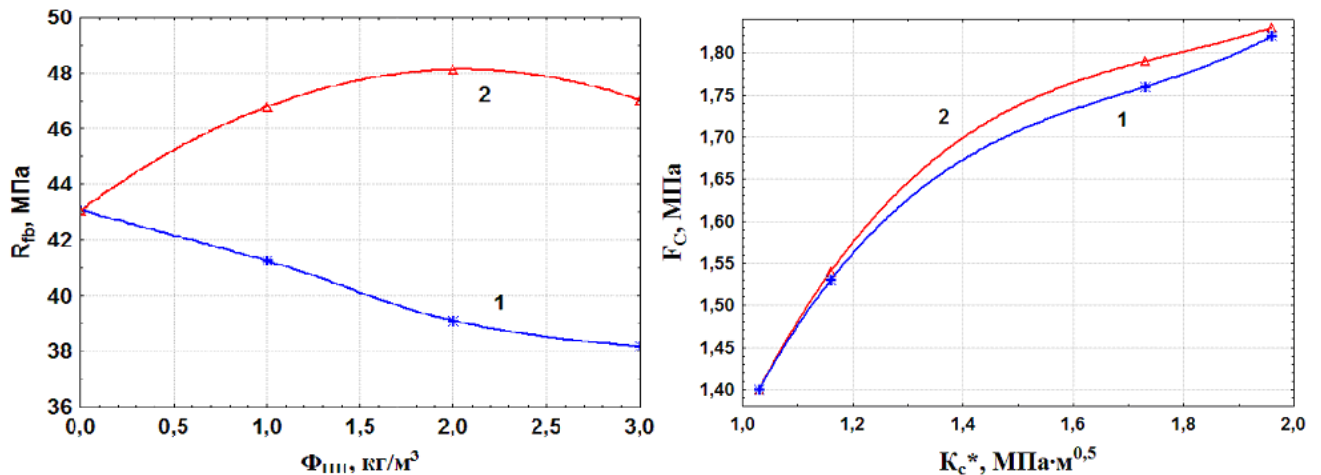


Рис. 5. - Изменение прочности и трещиностойкости мелкозернистых бетонов с обычной (1) и термообработанной (2) полипропиленовой фиброй

Повышение прочности и трещиностойкости фибробетона объясняется тем, что при термической обработке удаляется замасливатель, влияющий на качество адгезии и пористость контактной зоны, и происходит деформирование волокон, улучшающее анкеруемость и реализацию их механических свойств.

Для комплексной оценки взаимодействия и влияния модифицирующих компонентов на свойства ММФБ применялось математическое планирование эксперимента.

В качестве варьируемых величин приняты:

X_1 - расход микрокремнезема (МК), % от МКВ;

X_2 - расход гиперпластификатора (ГП), % от МКВ;

X_3 - расход полипропиленовой фибры ($\Phi_{ПП}$), кг/м^3 ;

X_4 – соотношение между песком и цементом (П/Ц).

На основании экспериментальных данных разработана 4-х факторная модель планирования эксперимента и получены уравнения плотности фибробетонной смеси (ρ_{fb} , кг/м^3), прочности при сжатии (R_{fb} , МПа) и на растяжении при изгибе (R_{ftb} , МПа) модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй:

$$\rho_{fb} = 2402,33 - 10,29 \cdot MK + 337,07 \cdot ГП - 13,94 \cdot \Phi_{III} - 15,11 \cdot П / Ц + 0,12 \cdot MK^2 - \\ - 184 \cdot ГП^2 + 2,91 \cdot \Phi_{III}^2 + 3,9 \cdot П / Ц^2 + 0,74 \cdot MK \cdot ГП + 0,003 \cdot MK \cdot \Phi_{III} + \\ + 1,09 \cdot MK \cdot П / Ц - 0,1 \cdot ГП \cdot \Phi_{III} - 9,6 \cdot ГП \cdot П / Ц - 0,05 \cdot \Phi_{III} \cdot П / Ц$$

$$R_{fb} = 30,83 - 0,223 \cdot MK + 64,17 \cdot ГП + 0,868 \cdot \Phi_{III} + 21,94 \cdot П / Ц - 0,024 \cdot MK^2 - \\ - 60,87 \cdot ГП^2 - 1,167 \cdot \Phi_{III}^2 - 3,858 \cdot П / Ц^2 - 0,025 \cdot MK \cdot ГП + 0,013 \cdot MK \cdot \Phi_{III} - \\ - 0,019 \cdot MK \cdot П / Ц + 6,6 \cdot ГП \cdot \Phi_{III} - 0,3 \cdot ГП \cdot П / Ц + 0,075 \cdot \Phi_{III} \cdot П / Ц$$

$$R_{fb} = 4,73 - 0,021 \cdot MK + 3,81 \cdot ГП + 0,132 \cdot \Phi_{III} + 1,16 \cdot П / Ц - 0,01 \cdot MK^2 - \\ - 3,68 \cdot ГП^2 - 0,075 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,209 \cdot П / Ц^2 + 0,002 \cdot MK \cdot ГП + 0,001 \cdot MK \cdot \Phi_{III} + \\ + 0,001 \cdot MK \cdot П / Ц + 0,383 \cdot ГП \cdot \Phi_{III} + 0,005 \cdot ГП \cdot П / Ц + 0,004 \cdot \Phi_{III} \cdot П / Ц$$

Разработанные многофакторные уравнения доказывают, что высокие прочностные характеристики модифицированных мелкозернистых фибробетонов формируются благодаря положительному взаимодействию микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры в оптимальных дозировках. Теоретические расчеты подтверждаются и практическими результатами. Так при расходе модифицирующих компонентов $MK=8\%$, $ГП = 0,5\%$ от МКВ и $\Phi_{III} = 2,3 \text{ кг/м}^3$ ($\mu_v = 0,25\%$) прочность при сжатии образца составила 83,6 МПа, что в 2 раза выше прочности контрольного состава мелкозернистого бетона без добавок.

Предварительные исследования влияния микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры на эксплуатационные показатели качества мелкозернистого бетона позволили определить их оптимальные дозировки (рис. 6) и разработать зависимости, позволяющие прогнозировать морозостойкость и водонепроницаемость модифицированного мелкозернистого фибробетона на стадии проектирования составов.

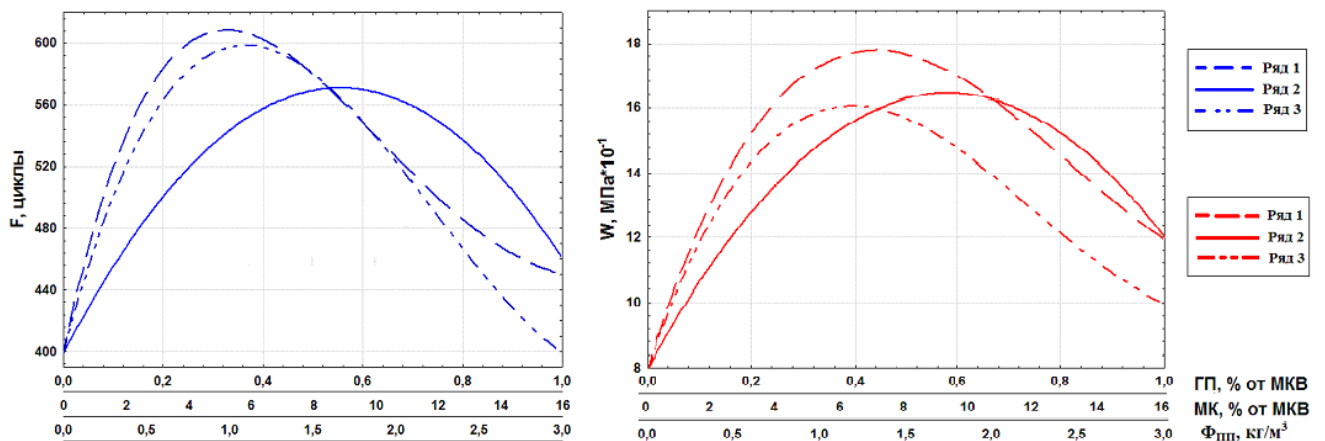


Рис. 6 – Зависимости морозостойкости и водонепроницаемости бетона от расхода: 1 – гиперпластификатора; 2 – микрокремнезема; 3 – полипропиленовой фибры

$$F = 500 + 9,2 * MK + 70 * ГП + 1183 * \Phi_{III} - 0,53 * MK^2 - 276,7 * ГП^2 - 50 * \Phi_{III}^2$$

$$W = 8,67 + 1,6 * MK + 20 * ГП + 4,7 * \Phi_{III} - 0,08 * MK^2 - 37,33 * ГП^2 - 1,03 * \Phi_{III}^2$$

Возникновение высоких прочностных и эксплуатационных характеристик модифицированного мелкозернистого фибробетона обусловлено уникальными свойствами модифицирующих компонентов и их взаимодействиями друг с другом. Анализ полученных данных в работе и исследований других ученых позволили разработать принципиальную схему механизмов взаимодействия (рис. 7) микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры и их влияния на формирование структуры композита.

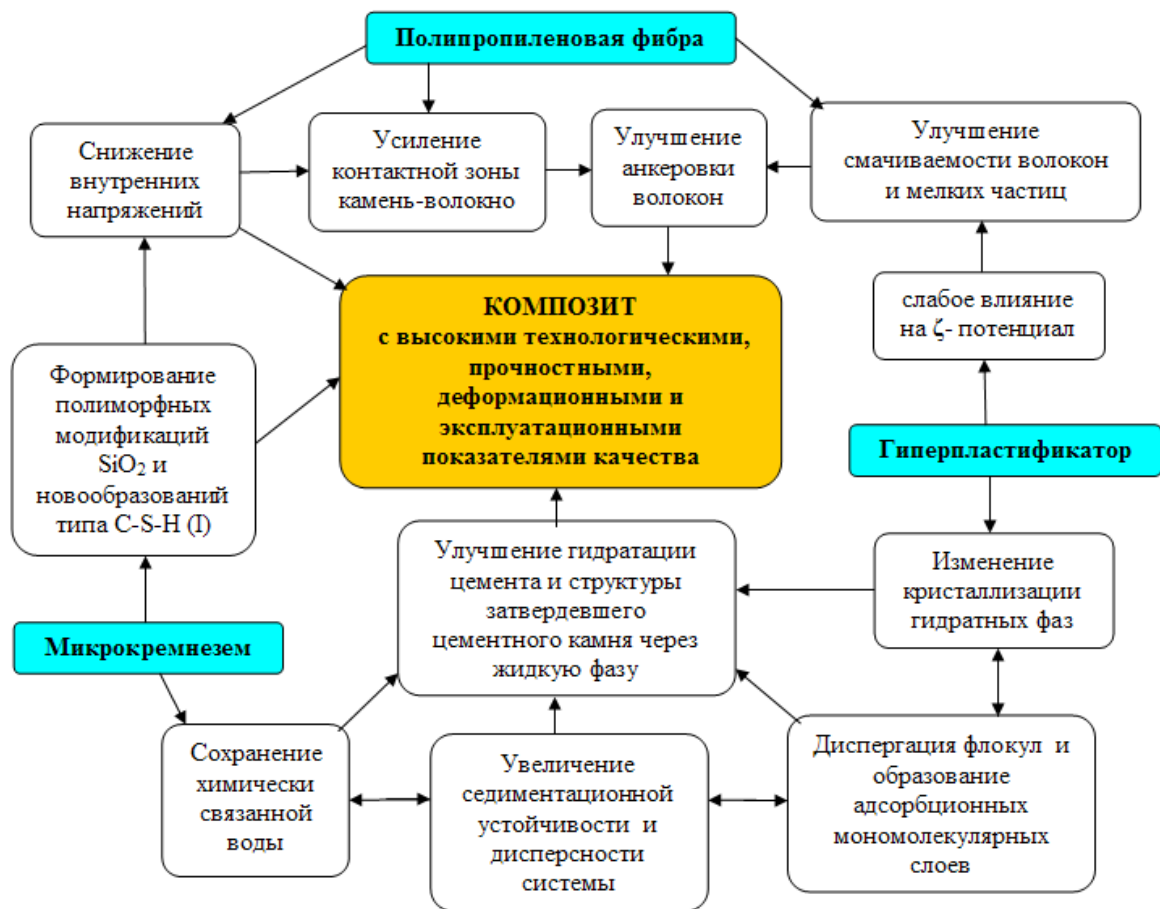


Рис. 7. – Схема механизмов взаимодействия модифицирующих компонентов

Таким образом, приобретение свойств определяется следующими влияниями и взаимодействиями модификаторов в составе бетона:

- использование микрокремнезема в составе многокомпонентного вяжущего способствует образованию полиморфных модификаций оксида кремния и низкоосновных гидросиликатов кальция типа C-S-H (I).

- при введении микрокремнезема уплотняется структура цементного камня и повышается анкеровка полипропиленовой фибры, которая является подложкой для

формирования кристаллических сростков, за счет образования вокруг волокон новообразований;

- гиперпластификатор создает адсорбционные оболочки, которые улучшают смачиваемость волокон, ускоряют гидратацию цемента, сглаживают поверхность наполнителей и уменьшают их трение между собой, улучшая реологические и технологические свойства смеси;

- совместное взаимодействие микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры повышает седиментационную и коагуляционную стойкость системы, создает условия для ускоренного набора прочности и увеличению степени гидратации цемента со временем;

- при термических воздействиях, деформациях усадки при твердении и работе в условиях попеременного высыхания и увлажнения модифицирующие компоненты снижают внутренние напряжения в бетоне, предупреждают микротрещинообразование и сохраняют эксплуатационные характеристики;

- модифицирующие компоненты улучшают структуру цементного камня, повышая прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства композита.

На основании проведенных исследований на предприятии ОАО «Костромской силикатный завод» (г. Кострома) оптимизированы и успешно применены составы модифицированных мелкозернистых фибробетонов при изготовлении тротуарной плитки в объеме 200 м² и бордюрных камней в количестве 780 шт. В дальнейшем произведены испытания готовой продукции и проведена оценка технико-экономической эффективности результатов внедрения.

Экономический эффект в ценах на 30 сентября 2015 года от внедрения результатов научных исследований составил – 97,15 рублей на 1 м³ бетона для производства тротуарной плитки и 105,02 рубля на 1 м³ бетона для производства бордюрных камней за счет снижения расхода цемента и энергозатрат.

Экономическая эффективность разработанных составов для плит тротуарных и бортового камня из модифицированного мелкозернистого фибробетона обусловлена также использованием доступных сырьевых материалов, уменьшением энергозатрат на тепловлажностную обработку изделий, получением изделий с улучшенными прочностными и эксплуатационными характеристиками без изменения технологической схемы и режима работы предприятия.

Заключение

Итоги выполненного исследования:

1. Произведен рентгенофазовый анализ и получены дифрактограммы цементного камня обычного и модифицированного вяжущего. Определены их минералогические составы и доказано формирование более слитной и однородной структуры композита за счет новообразований.

2. Исследованы механизмы и разработана схема взаимодействия микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры при формировании структуры и процессах твердения цементного камня и установлено их влияние на технологические, прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства мелкозернистых бетонов.

3. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность значительного повышения прочности и трещиностойкости фибробетона за счет термической обработки фибры, способствующей деформированию волокон, ускорению гидролиза и экстракции аппретов с их поверхности. Применение термообработанной полипропиленовой фибры позволило повысить прочность фибробетона при сжатии до 12 %, на растяжение при изгибе – до 10 %.

4. При исследованиях вязкости разрушения выявлено, что фактический прогиб до разрушения образцов-балочек из мелкозернистого фибробетона оказался выше контрольного в 1,85 раза, значения трещиностойкости мелкозернистого фибробетона увеличились в 1,9 раза по сравнению с контрольным составом, при коэффициенте армирования $\mu_v = 0,33 \%$ ($\Phi_{III} = 3 \text{ кг/м}^3$) сопротивление разрушающей нагрузке возрастает до 90 %.

5. Разработаны многофакторные математические модели расчета и прогнозирования технологических, прочностных и эксплуатационных свойств модифицированного мелкозернистого фибробетона при разных П/Ц и с учетом структурных характеристик C и W .

6. Изучены термические и усадочные деформации ММФБ в условиях квазистатической сушки. На основании исследований температурного расширения материалов доказано, что на усадку влияют условия твердения, водовяжущие отношения составов и теплофизические свойства компонентов смеси. Модифицированные составы имеют минимальные значения «расширения - усадки» в

диапазоне температур от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$, что подтверждается результатами исследований коэффициентов линейной температурной деформации композитов.

7. Исследовано совместное влияние модификаторов структуры на прочность, морозостойкость и водонепроницаемость мелкозернистого бетона и получены зависимости для расчета и прогнозирования эксплуатационных характеристик ММФБ. Установлено, что взаимодействие микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры позволяет увеличить прочность мелкозернистого бетона в 1,5 - 2 раза, морозостойкость в 1,5 раза, водонепроницаемость - в 2,2 раза. Оптимальное соотношение модифицирующих компонентов для достижения максимальных показателей прочности составляет 1:0,062:0,05 по массе, для показателей морозостойкости и водонепроницаемости - 1:0,133:0,025 по массе.

8. Разработаны методики и алгоритм расчета состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй с заданными свойствами при помощи математических моделей структурных, прочностных и эксплуатационных характеристик. С их помощью получены составы модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй марок по удобоукладываемости Ж1-Ж3 и П1-П5, прочностью при сжатии до 84 МПа, прочностью на растяжение при изгибе до 7,5 МПа, морозостойкостью 600 циклов и водонепроницаемостью $18\text{ МПа}\cdot 10^{-1}$.

9. Долгосрочные испытания образцов, выдержанных 3 года в уличных условиях, позволили установить сохранность полипропиленовых волокон и отсутствие внешних дефектов. Прочность при сжатии образцов (при расходе МК = 8 %; ГП = 0,25 %; $\Phi_{\text{ПП}} = 1\text{ кг/м}^3$ ($\mu_v = 0,11\text{ \%}$)) возросла на 18 % за первый год твердения, на 32 % - за два года и на 44 % за три года твердения.

10. Произведены радиологические исследования модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй спектрометрическим методом и установлено соответствие полученных данных санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к строительным материалам.

11. Разработаны «Рекомендации по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных изделий и конструкций».

12. Разработан «Технологический регламент на производство модифицированных мелкозернистых фибробетонных смесей для дорожных изделий» для ОАО «Костромской силикатный завод».

13. Осуществлено внедрение результатов исследований на предприятии ОАО «Костромской силикатный завод» (г. Кострома) при изготовлении тротуарной плитки в объеме 200 м² и бордюрных камней в количестве 780 шт.

Экономический эффект в ценах на 30 сентября 2015 года от внедрения результатов научных исследований составил – 97,15 рублей на 1 м³ бетона для производства тротуарной плитки и 105,02 рубля на 1 м³ бетона для производства бордюрных камней за счет снижения расхода цемента и энергозатрат.

14. Для оценки эксплуатационных показателей качества произведены испытания готовой продукции, результаты которых отражены в научно – практической работе «Исследование свойств и испытание дорожных изделий и конструкций из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй».

Перспективы дальнейшей разработки темы. Рациональным являются исследование разных видов замасливателей, химических процессов, протекающих при их гидролизе, и оценка их воздействия на качество контактной зоны «цементный камень-волокно». Для улучшения адгезии и анкеруемости в цементном камне особый интерес могут представлять исследования способов и разработка технологии химической обработки волокон. Разработка методик оценки технико – экономической эффективности применения модифицированных фибробетонов и долговечности конструкций из них позволяют решить вопросы ресурсосбережения и межремонтного ресурса.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в ведущих журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Зотов А. Н. Исследование и прогнозирование технологических свойств бетонных смесей с полипропиленовой фиброй // Вестник гражданских инженеров. - 2014. - № 1. - С. 79-83.

2. Зотов А. Н. Исследование прочностных свойств мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй для дорожного строительства // Промышленное и гражданское строительство. - 2015. - № 8. - С. 42-46.

Патент:

3. Состав фибробетона: пат. № 2583965 Рос. Федерация: МКП С04В 28/04, С04В 16/06, С04В 111/20 / А. Н. Зотов; заявитель и патентообладатель А.Н. Зотов. – № 2583965, заявл. 06.11.2014; опубл. 10.05.16, Бюл. № 13. – 6 с.

Публикации в других изданиях:

4. Соболев Г.М., Кузнецова Е.Ф., Зотов А.Н. Основы технологии многокомпонентных бетонов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. статей 65-й международной научно – практической конференции (6 февраля 2014 года): в 3 т. Том II. – Караваево: Костромская ГСХА, 2014. – С. 47-50.

5. Зотов А. Н. Эффективность применения комплексной добавки с полипропиленовым фиброволокном в конструкциях мостовых и гидротехнических сооружений / Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций // Материалы XVIII научно-методической конференции ВИТУ (13 марта 2014 года) ВИ(ИТ) ВА МТО (ВИТУ). - СПб.: 2014. – С. 84-89.

6. Зотов А. Н. Мелкозернистые бетоны на смешанных вяжущих и их структурные характеристики // Международная научно-практическая конференция «Технические науки: теория, методология и практика», г. Москва, 17 июня 2014 г.: сб. науч. докл. – М.: АНО Изд. Дом «Науч. обозрение», 2014 – С. 18-25.

7. Зотов А. Н. Обследование и ремонт металлической коробчатой балки / Обследование зданий и сооружений: Проблемы и пути их решения // Материалы V международной научно-практической конференции (17 октября 2014 года).- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 34-43.

8. Зотов А. Н. Прочностные и деформационные свойства мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй / Наука и образование в XXI веке // сб. науч. тр. по матер. Международной научно-практической конференции (31 октября 2014 года) в 17 частях. Ч. 9. - Тамбов.: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. – С. 43-47.

9. Соболев Г.М., Зотов А.Н. Исследование свойств модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. статей 66-й международной научно – практической конференции (22 января 2015 года): в 3 т. Том II. – Караваево: Костромская ГСХА, 2015. – С. 35-39.

10. Соболев Г.М., Зотов А.Н. Модифицированные фибробетоны с повышенными эксплуатационными характеристиками // Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. – Выпуск 82. – Караваево: Костромская ГСХА, 2015. – С. 55-61.

11. Зотов А. Н. Прочностные свойства мелкозернистых бетонов с модифицированной полипропиленовой фиброй / Техника и технологии: роль в развитии современного общества // сб. науч. тр. по матер. IV Международной научно – практической конференции (27 января 2015 года).- Краснодар: Научно – издательский центр Априори, 2015 – С. 44-49.

12. Зотов А. Н. Оптимизация составов и прогнозирование прочностных свойств модифицированных фибробетонов / Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени // Материалы VII Международной научно – практической конференции (6-7 марта 2015 года), часть 4.- Екатеринбург.: Национальной ассоциации ученых (НАУ), 2015.- № 2(7). – С. 115-118.

13. Зотов А. Н. Оценка прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонной плиты при статическом нагружении / Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций // Материалы XIX научно-методической конференции ВИТУ (19 марта 2015 года) ВИ(ИТ) ВА МТО (ВИТУ).-СПб.: 2015. – С. 204-208.

14. Зотов А. Н. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе многокомпонентного вяжущего / Современные концепции научных исследований // Материалы XV Международной научно – практической конференции (25-27 июня 2015 года), часть 2.- М.: Евразийский союз ученых (ЕСУ), 2015.- № 6 (15). – С. 86-89.