

На правах рукописи



КОЛОТУШКИН Алексей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ
И ХИМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
НАПОЛНЕННЫХ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва».

- Научный руководитель — академик РААСН,
доктор технических наук, профессор
Селяев Владимир Павлович
- Официальные оппоненты — **Соколова Юлия Андреевна**,
академик РААСН, доктор технических
наук, профессор, ФГБОУ ВО «Националь-
ный исследовательский Московский госу-
дарственный строительный университет»,
консультант кафедры «Технология вяжу-
щих веществ и бетонов»
- **Акулова Марина Владимировна**,
советник РААСН, доктор технических
наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный политехнический уни-
верситет», заведующий кафедрой «Строи-
тельное материаловедение и технологии»
- Ведущая организация — федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего об-
разования «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 28 июня 2019 г. в 13-00 часов на заседании диссер-
тационного совета Д 212.184.01, созданного на базе Пензенского государ-
ственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028,
г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, корп. 1, конференц-зал.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке Пен-
зенского государственного университета архитектуры и строительства и на
официальном сайте университета: [http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-
us/d-212-184-01/101-14-kolotushkin-aleksey-vladimirovich](http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/d-212-184-01/101-14-kolotushkin-aleksey-vladimirovich).

Автореферат разослан 26 апреля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бакушев
Сергей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

В мировой строительной практике стремительно возрастают доля высокопрочных бетонов и их роль в сооружении современных высотных зданий и большепролетных конструкций. Применение новых технологических приемов, введение в состав вяжущего минеральных и органических добавок позволили повысить прочность цементных композитов от 20 до 200 МПа, морозостойкость от 100 до 1 000 циклов.

Специалисты в области строительного материаловедения Ю. М. Баженов, В. Т. Ерофеев, В. И. Калашников, С. С. Каприелов, П. Г. Комохов, В. С. Лесовик, В. П. Селяев, В. И. Соломатов, С. В. Федосов, Е. М. Чернышов отмечали, что эволюционное развитие строительных композитов связано с решением задач формирования структур на различных масштабных уровнях. Именно новые подходы к формированию микроструктуры цементных композитов позволили добиться резкого увеличения прочностных и физических свойств материала. Химическое сопротивление цементных композитов, наряду с прочностными характеристиками, в значительной степени зависит от структуры цементного камня.

Результаты исследований, проведенных отечественными и зарубежными учеными, показали, что при формировании микроструктуры необходимо наряду с традиционными методами (ударными, вибрационными, перемешиванием) применять более тонкие методы активации: акустические, магнитострикционные, химические.

Наиболее доступным способом управления процессом формирования структуры и характеристик цементных композитов является использование полифункциональных химических добавок на основе супер- и гиперпластификаторов и тонкодисперсных минеральных наполнителей. Однако влияние тонкодисперсных минеральных наполнителей, а также супер- и гиперпластификаторов на химическое сопротивление цементных композитов изучено недостаточно. Поэтому проблема повышения прочности, химического сопротивления и сокращения сроков схватывания цементных композитов без снижения прочностных характеристик является актуальной. Ее решение позволит повысить долговечность и надежность зданий и сооружений.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам повышения прочности цементных композитов в последние годы много внимания уделяется в работах российских и зарубежных ученых. Повышение прочности и создание высокопрочных бетонов является основным трендом современного строительного материаловедения.

Для повышения прочности цементных бетонов предлагались различные методы активации вяжущего: процессы механической активации рассмотрены в работах О. Я. Берга, И. Н. Ахвердова, Г. Н. Писанко,

Ю. М. Баженова; методы химической активации предложены в работах В. И. Соломатова, А. В. Саталкина, В. И. Калашникова; методы, основанные на применении суперпластификаторов в комбинации с аморфным микрокремнеземом, описаны С. С. Каприеловым; электромагнитная активация предлагается в работах С. В. Федосова, В. Т. Ерофеева. Однако многие процессы, сопутствующие повышению прочности и структурообразованию, связанные с появлением новых супер- и гиперпластификаторов (Sika ViscoCrete, Хидетал и др.), аморфных микрокремнеземов с более высоким содержанием оксида кремния и зерен с крупностью наноразмерного уровня, новых экспериментальных установок для создания магнитных полей с целью активации смесей цементных композитов, остаются недостаточно изученными с позиции концепции повышения прочности и химического сопротивления цементных композитов.

Существуют разные точки зрения на моделирование работы железобетонных конструкций в условиях воздействия на них агрессивных сред. Некоторые исследователи придерживаются мнения о затухающем характере деградации из-за развития кольматационного эффекта. Другой подход состоит в том, что процесс деградации не затухает, а развивается во времени до полного разрушения образца. В связи с этим механизм химического сопротивления цементных композитов нуждается в дополнительном экспериментально-теоретическом обосновании.

Цели и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является экспериментально-теоретическое обоснование закономерностей повышения прочности и химического сопротивления цементных композитов, изготовленных с применением тонкодисперсных минеральных наполнителей, супер- и гиперпластификаторов, и разработка рекомендаций по стабилизации свойств в процессе эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать аналитическую модель разрушения бетона под действием растягивающих и сжимающих нагрузок, объясняющую механизм разрушения (отрывной или сдвиговый) при сжатии, зависимость прочности бетона от размеров дефектов структуры и зерен заполнителя и коэффициента трения бетона о бетон;
- экспериментально определить величину коэффициента трения бетона о бетон и установить корреляцию между прочностью при сжатии, растяжении и коэффициентом трения;
- установить закономерности воздействия внешних агрессивных сред, содержащих ионы хлора и сульфат-ионы, на высокопрочные цементные композиты; разработать методы определения основных параметров (физических характеристик) химического сопротивления, которые дают возможность оценить ресурс и долговечность изделий из цементных ком-

позитов;

- разработать составы цементных композиций для высокопрочных бетонов с применением суперпластифицирующих добавок в комбинации с тонкодисперсными активными минеральными наполнителями;

- изучить химический, элементный, гранулометрический состав микрокремнезема полученного золь-методом из диатомита Атемарского месторождения Республики Мордовия, и оценить возможность его применения для наполнения цементных вяжущих;

- изучить влияние магнитных полей соленоида на прочность и сроки схватывания наполненных цементных композитов.

Научная новизна работы

Теоретически на основе анализа теорий Кулона – Навье и Гриффитса разработана модель сопротивления бетона силовым воздействиям, согласно которой разрушение бетона рассматривается как процесс развития трещин под действием касательных и нормальных сжимающих напряжений. При этом наиболее неблагоприятной ориентацией трещины является ее расположение к направлению силовых линий под углом 90° при растяжении и 45° при сжатии. Установлена корреляционная зависимость между прочностью бетона при сжатии и при растяжении и коэффициентом трения бетона о бетон, вид которой определен аналитически и адекватность подтверждена экспериментальными данными. Экспериментально установлено, что коэффициент трения бетона о бетон может изменяться в пределах 0,5–0,8 для бетонов классов В25–В50 и его величина коррелируется с классом бетона по прочности на сжатие прямо пропорциональной зависимостью.

Выявлены закономерности воздействия внешних агрессивных сред, содержащих ионы хлора и сульфат-ионы, на высокопрочные цементные композиты. Установлено, что на начальном этапе коррозии заметно проявление кольматационного эффекта и временное повышение прочности, но после 28 суток взаимодействия цементных композитов с водными растворами соляной и серной кислот наблюдается разрушение структуры и падение прочности. При взаимодействии цементных композитов с раствором NaCl кольматационный эффект более продолжителен. Экспериментально показано, что включением в состав цементных композитов пластифицирующих добавок и тонкодисперсных минеральных наполнителей, содержащих диоксид кремния, можно замедлить процесс коррозии и повысить химическое сопротивление и прочность цементных композитов. Предложены и обоснованы методы определения основных характеристик химического сопротивления (предельная сорбционная емкость, коэффициент диффузии, коэффициент химического сопротивления).

Оптимизированы с применением полиномиальных моделей технологические режимы изготовления цементных композитов, позволяющие на основе цементных вяжущих, наполненных микрокремнеземом и модифи-

цированных суперпластификаторами поликарбоксилатного типа, получить композиты с прочностью на сжатие свыше 100 МПа на седьмые сутки твердения.

Установлены морфологические характеристики частиц микрокремнезёма, полученного из диатомита Атемарского месторождения, топографические и фрактальные параметры их поверхности, объясняющие его высокую реакционную активность, что позволяет использовать этот полидисперсный материал как активную добавку к сухим строительным смесям и цементным композитам.

Установлено, что магнитная активация сокращает сроки схватывания (начала схватывания на 30–48 %, конца схватывания на 26–39 %) и повышает прочность (до 30 %) цементных композитов, наполненных пиритными огарками, определены оптимальные режимы их твердения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Расширены теоретические основы механики разрушения бетона: получена аналитическая зависимость между отношением прочности бетона при сжатии к прочности при растяжении и коэффициентом трения; теоретически установлено, что при разрушении элемента микроструктуры бетона наиболее неблагоприятной ориентацией трещины является расположение ее к направлению силовых линий под углом 90° при растяжении и 45° при сжатии.

Обоснованы методы определения сорбционных характеристик, опирающиеся на законы физической химии.

Разработаны составы цементных композиций для высокопрочных бетонов с применением современных поликарбоксилатных гиперпластификаторов.

Выявлены оптимальные режимы магнитной активации наполненных цементных композитов. Показана возможность влияния активации с помощью магнитных полей на прочностные характеристики цементных композитов. Установлено, что применение магнитной активации дает возможность получить цементные композиты, наполненные пиритными огарками, с повышенным (до 30 %) пределом прочности при сжатии.

Методология и методы диссертационного исследования

Методологической основой диссертационного исследования послужили результаты фундаментальных и прикладных научных исследований отечественных и зарубежных учёных в области создания высокопрочных материалов, современные положения теории физической химии и механики разрушения.

Методическую основу диссертационной работы составляли физико-механические и физико-химические методы исследований, методы статистической обработки, анализа и оптимизации результатов экспериментальных данных. При проведении экспериментальных исследований использо-

вались стандартные средства измерений и современное оборудование, прошедшие метрологическую поверку.

Положения, выносимые на защиту

Модель, основанная на применении теорий Гриффитса, Мора и Кулона – Навье, объясняющая механизм разрушения цементных композитов под действием растягивающих и сжимающих нагрузок.

Результаты оптимизации прочностных характеристик цементных композитов и мелкозернистых бетонов с применением поликарбоксилатных суперпластификаторов и микродисперсных добавок.

Результаты экспериментального исследования по воздействию агрессивных сред на сорбционные и прочностные характеристики цементных композитов различных составов.

Результаты оптимизации технологических режимов твердения цементных композитов в магнитном поле соленоида.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается: сопоставлением теоретических исследований с результатами статистической обработки экспериментальных данных, полученных нами и другими учеными; проведением исследований на оборудовании, прошедшем метрологическую поверку; применением методов статистического анализа для оценки достоверности, значимости и воспроизводимости результатов экспериментальных исследований.

Внедрение результатов исследования

Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась в ООО «Минпол» и ООО «Волговятстрой» (г. Саранск).

Теоретические положения диссертационной работы, а также результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 08.03.01 «Строительство» (профили «Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство и хозяйство»).

Апробация работы

Положения и результаты диссертационного исследования были изложены на научно-технических семинарах кафедры «Строительные конструкции» МГУ им. Н. П. Огарёва, научно-технических конференциях «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (Саранск, 2011, 2012, 2013, 2016 гг.), Всероссийской научно-технической конференции «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций» (Саранск, 2014 г.).

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 20 научных работах, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК, – 8 научных работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 207 наименований, трех приложений. Материал диссертации изложен на 177 страницах, включает 52 рисунка, 41 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранного направления исследований, сформулированы цели и задачи работы, показаны ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе осуществлён анализ современных тенденций развития технологий создания бетонов нового поколения, прослежены эволюционные этапы развития знаний о принципах образования структуры бетона, технологии приготовления бетонной смеси, а также рассмотрены структурообразующие компоненты, входящие в состав бетона. Предложено рассматривать бетон в виде сложной иерархически организованной масштабно-инвариантной системы, из чего следует вывод о многоуровневом принципе формирования макро-, микро- и наноструктур. Оптимизация структуры на соответствующем масштабном уровне (от макро- до нано-) предполагает применение новых методов технологического воздействия для каждого структурного уровня. Для эффективного управления процессом формирования структуры бетона на первых этапах широко применялись методы механического воздействия на бетонные смеси, затем получили развитие различные способы физико-химической и химической модификации, основанные на применении супер- и гиперпластификаторов, существенно улучшающих технологические параметры, прочностные и эксплуатационные свойства цементных композитов. На современном этапе для управления процессом формирования микро- и наноструктур проводятся исследования по применению акустических, бифуркационных, кавитационных и электромагнитных воздействий.

Рассмотрены предлагаемые варианты классификации высокопрочных бетонов, проанализированы современные предложения по их получению методом подбора состава. Показана актуальность применения сверхпрочного бетона в производстве строительных изделий и конструкций различного назначения, технические и технологические характеристики которых обеспечивают многофункциональность и высокую экономическую эффективность их использования. Установлено, что совместное применение химических и минеральных тонкомолотых добавок является самым доступным и универсальным методом формирования структуры и свойств высокотехнологичного бетона. Анализ свойств наиболее широко применяемых в мировой практике минеральных добавок (микрокремнезема, золы-уноса, молотого доменного шлака и тонкомолотого природного цеолита) показал, что для создания высокопрочных бетонов целесообразно применять микрокремнезем совместно с гиперпластификаторами.

В результате анализа литературных данных установлено, что в последние годы развитие технологии производства бетонов ориентировано на применение различных методов активации, поэтому в работе акцентировано внимание на понятии, что такое активация, особенностях активированных бетонов и на влиянии активации на химическое сопротивление и прочность цементных композитов. Рассмотрены методы активации, основанные на механических, физических, физико-химических и химических способах воздействия на отдельные компоненты и на их композиции. Увеличение активности материалов путем механоактивации (измельчения и диспергации частиц наполнителя) достаточно энергоемко и сложно получить частицы наноразмерного уровня, поэтому все чаще применяются физико-химические методы (вакуумное осаждение, восстановление из химических соединений, термическое разложение прекурсоров, электролиз и др.). В последнее время с появлением новых гипер-, суперпластификаторов большое внимание уделяется химическим методам активации бетонных смесей. Получают развитие исследования по магнитным методам активации путем воздействия на структуру и свойства воды затворения и цементных композитов электромагнитными полями.

В результате анализа подтверждена целесообразность развития расчетно-теоретических методов подбора состава высокопрочного бетона с заданными характеристиками и методов прогнозирования его технических и технологических качеств. Анализ гипотез механики разрушения бетона показал, что прочность композитов зависит от размера дефектов структуры, количества неоднородностей, концентраторов напряжений, температуры, соотношения модулей упругости и объемного содержания матрицы и наполнителя, полноты сцепления матрицы с заполнителем, количества и размера пор.

Обращено внимание на корреляционную зависимость пористости и плотности композитов от технологических характеристик смесей, таких как подвижность и водопотребность, водоотделение и расслаиваемость, показано их влияние на прочность и долговечность бетона. Установлено, что создание высокопрочных бетонов и конструкций на их основе должно опираться на экономические и экологические факторы, применение местного сырья, снижение энергетических затрат и уменьшение трудоемкости, рациональный выбор методов возведения и используемого оборудования.

Во второй главе приведены характеристики материалов, ингредиентов и оборудования, применяемых при проведении экспериментальных исследований, а также описаны методы проведения соответствующих экспериментов. Вяжущим компонентом в составах использовался цемент ПЦ 500-Д0 ОАО «Мальцовский цементный завод», а также цементы ПЦ 500-Д0-Н и ПЦ 400-Д0 ОАО «Мордовцемент». В качестве мелкого заполнителя применялся песок Ичалковского месторождения с модулем крупности 1,7. В качестве реакционно-химических минеральных тонкодисперсных

добавок использовались различные модификации микрокремнезема, а также диоксид титана TiO_2 . В составы вводились микрокремнезем уплотненный МКУ-85 Челябинского металлургического комбината, тонкодисперсный осажденный диоксид кремния БС-100 производства ОАО «Сода», Аэросил А-300 Калужского опытно-экспериментального завода, а также микродисперсный кремнезем, полученный гель-методом из природного диатомита Атемарского месторождения. Кроме того, использовался комплексный модификатор бетона МБ 10-01. В качестве суперпластификаторов применялись жидкий суперпластификатор российского производства Хидетал-ГП-9γ, зарубежные гиперпластификаторы серии Sika ViscoCrete (20 HE, 25 RU, 5 New, 5 New ST), а также пластифицирующая добавка Пластанол-7, близкая по основным свойствам к немецкому пластификатору «Пластолит-Ф». В эксперименте в качестве магниточувствительного наполнителя применялись пиритные огарки в виде порошка.

Для создания магнитного поля применялась многослойная катушка с количеством витков $N = 2\ 100$ и диаметром медного провода 1,2 мм. Внутренний диаметр катушки при этом равен 23 см, а внешний – 27,4 см. Измерение магнитного поля производили измерителем магнитной индукции Ш1-8. В приборе для измерения магнитного поля используется эффект Холла. Динамический модуль упругости определяли на ультразвуковом приборе УКБ-1М.

Проведены исследования частиц дисперсного микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения. Исследование структуры осажденного микрокремнезема проводилось методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-6. ИК – спектры поглощения микрокремнезема, выделенного из Атемарского диатомита, получены на Фурье-спектрометре «Инфралюм ФТ-02» в диапазоне волновых чисел $450\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. Гранулометрический состав микрокремнезема изучался посредством анализатора размеров частиц Shimadzu SALD-3101. Термогравиметрический анализ проводился термогравиметрическим анализатором TGA/SDTA 851e в интервале температур $25\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$. Исследование тонкой структуры поверхности частиц микрокремнезема проведено с помощью многофункционального растрового электронного микроскопа FEI Quanta 3D 200i при увеличении до 24000х. Структурные неоднородности частиц микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения, исследовались малоугловым рентгеновским дифрактометром HecusS3-MICRO.

Согласно данным рентгеноструктурного анализа, диоксид кремния дисперсного микрокремнезема представлен аморфной фазой. Инфракрасные спектры микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения, содержат полосы поглощения, характерные для валентных, деформационных и либрационных колебаний адсорбированных молекул воды, частично заполняющих поровое пространство частиц дис-

персного кремнезема. Анализ гранулометрических характеристик аморфного микрокремнезема показал, что в состав этого полидисперсного материала входит до 17 % частиц (агломератов) размером 330–450 нм. Термогравиметрические измерения показывают возможность частичной дегидратации порошка дисперсного микрокремнезема при его прокаливании при температурах $\sim 500^\circ\text{C}$.

Проведенные исследования микрокремнезема, полученного из диатомита Атемарского месторождения, подтверждают наличие развитой поровой структуры частиц полидисперсного порошка, что соответствует системе с большой удельной поверхностью. Содержание значительного числа частиц и пор нанометровых размеров ведет к увеличению реакционной способности дисперсного материала, что дает возможность использования его как активной добавки к сухим строительным смесям и цементным композитам.

В третьей главе проведен анализ теорий прочности, применяемых для описания разрушения материалов. Бетон может разрушаться путем отрыва и среза, поэтому конкретный материал и тип напряженного состояния в частном порядке определяет выбор расчетной модели.

Теоретически показано, что прочность цементных композитов зависит от размера, количества дефектов, крупности заполнителя и сцепления матрицы с поверхностью наполнителя. Размеры и количество дефектов можно уменьшить применением более мелких заполнителей, повышением плотности упаковки зерен наполнителя, путем снижения пористости и увеличения площади сцепления между наполнителем и матрицей, что можно достичь использованием суперпластификаторов и наполнителей с наноразмерными частицами.

Проанализирована зависимость прочности бетона от коэффициента трения. Получено выражение, из которого следует, что прочность бетона на сжатие R_b больше прочности на растяжение R_{bt} , и это соотношение зависит от коэффициента трения γ :

$$\frac{R_b}{R_{bt}} = \frac{4k_2}{k_1(1-\gamma)}. \quad (1)$$

В формуле (1) коэффициенты k_1 и k_2 – константы материала, в первом приближении можно принять $k_1 = k_2$ или k_1 .

В таблице 1 представлены значения R_b/R_{bt} , полученные путем вычислений по формуле (1) и по функциям, предложенным Брейсом и Хуком, при изменении коэффициента трения в пределах от 0 до 1,0.

На рисунке 1 изображены графики зависимости соотношения R_b/R_{bt} от коэффициента трения γ по формулам Хука – Бенявского, Брейса – Марелла и (1) и от класса бетона по прочности на сжатие по данным СП 63.13330.2012.

Таблица 1 – Сопоставление расчетных значений R_b/R_{bt} , полученных по формулам (1), Хука – Бенявского и Брейса – Марелла

№ п/п	Формула для определения R_b/R_{bt}	Значения коэффициента трения γ					
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1	Хука – Бенявского $\frac{R_b}{R_{bt}} = \frac{\sqrt{1+\gamma^2}+\gamma}{\sqrt{1+\gamma^2}-\gamma}$	1,00	1,49	2,18	3,12	4,33	5,83
2	Брейса – Марелла $\frac{R_b}{R_{bt}} = \frac{4}{(\sqrt{1+\gamma^2}-\gamma)}$	4,00	4,88	5,91	7,06	8,32	9,66
3	$\frac{R_b}{R_{bt}} = \frac{4k_2}{k_1(1-\gamma)}$	5,40	6,75	9,00	13,50	27,00	∞

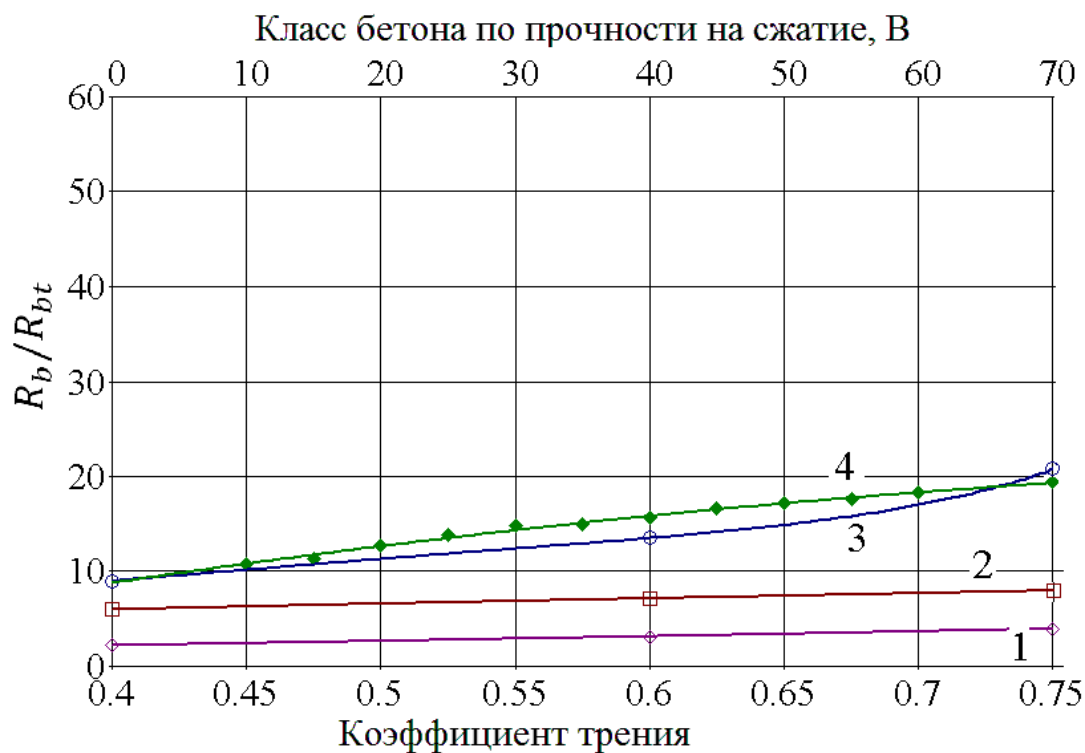


Рисунок 1 – Зависимость соотношения R_b/R_{bt} от коэффициента трения γ по формулам Хука – Бенявского (1), Брейса – Марелла (2), $\frac{R_b}{R_{bt}} = \frac{4k_2}{k_1(1-\gamma)}$ при $k_2/k_1 = 1,35$ (3), – от класса бетона по прочности на сжатие по данным СП 63.13330.2012 (4)

Установлено, что отношение прочности на сжатие к прочности на растяжение для цементных бетонов колеблется в пределах от 7 до 22, коэффициент трения при этом изменяется в пределах от 0,4 до 0,8. Результаты получены в соответствии с данными СП 63.13330.2012, экспериментально и по формуле (1).

Расчетные данные, представленные в таблице 1 и на рисунке 1, позволяют сделать вывод о том, что формула (1) при изменении γ в пределах от 0 до 1 достоверно отражает зависимость соотношения прочностей R_b/R_{bt} от коэффициента трения.

Экспериментальным методом установлено, что коэффициент трения бетона о бетон может изменяться в пределах от 0,5 до 0,8 для бетонов классов В25-В50 и его величина зависит от класса бетона по прочности на сжатие. Коэффициент трения увеличивается с повышением класса бетона и зависит от прижимающей силы, что свидетельствует о сложной структуре поверхности бетона, который по своей природе является шероховатым пористым материалом. Коэффициент трения выше у водонасыщенных образцов, т.е. водонасыщение бетона обеспечивает лучшее сцепление при контакте.

В четвертой главе экспериментально исследована зависимость прочностных характеристик мелкозернистого бетона от крупности мелкого заполнителя; изучена эффективность применения поликарбоксилатных суперпластификаторов в сочетании с добавками на основе микрокремнезема при использовании в качестве мелкого заполнителя песка различных фракций Ичалковского месторождения Республики Мордовия. Установлено, что изменение прочности мелкозернистого бетона не подчиняется аналитическим зависимостям, полученным для бетонов со структурой конгломератного типа. Дефекты, формируемые заполнителем и поровым пространством, вступают в синергетическое взаимодействие и могут позитивно влиять на изменение прочностных характеристик.

Проведены исследования по подбору составов цементных композиций для высокопрочных бетонов с применением современных поликарбоксилатных суперпластификаторов. В качестве минеральных тонкодисперсных добавок использовались различные модификации микрокремнезема, а также диоксид титана (TiO_2).

В результате испытаний образцов, изготовленных из вяжущих на основе портландцемента марки ПЦ 400-Д0, с различным содержанием МКУ-85 (X_1) и поликарбоксилатного суперпластификатора Хидетал-ГП-9 γ (X_2) при водоцементном отношении 0,32, получены полиномиальные уравнения регрессии с оптимизацией по пределу прочности при сжатии ($R_{сж}$) и растяжении при изгибе ($R_{изг}$):

$$R_{сж} = 58,7 + 1,9X_1 - 3,0X_2 - 1,8X_1^2 - 1,1X_1X_2 + 1,1X_2^2 - 0,5X_1^4 - 1,9X_1X_2^2 - 3,8X_2^4; \quad (2)$$

$$R_{изг} = 6,7 + 0,3X_1 - 2,6X_2 - 0,2X_1^2 - 0,3X_1X_2 - 0,3X_2^2 + 0,7X_1^4 - 0,2X_1^2X_2 - 0,5X_1X_2^2 + 2,6X_2^4. \quad (3)$$

По полиномиальным уравнениям построены изолинии влияния содержания МКУ-85 и поликарбоксилатного суперпластификатора Хидетал-ГП-9γ на прочностные характеристики цементных композитов (рисунок 2).

В таблице 2 приведены прочностные характеристики цементных композитов с уплотненным микрокремнеземом МКУ-85, в качестве вяжущего в которых использовался цемент ПЦ М500-Д0 ОАО «Мальцовский цементный завод», а пластифицирующей добавки – зарубежные суперпластификаторы серии Sika ViscoCrete. Также были испытаны образцы цементных композитов, в составе которых в качестве реакционно-химических добавок применялись различные типы микрокремнезёма и диоксид титана (TiO_2). Порошок TiO_2 использовался для сравнения эффективности применения с наполнителями, содержащими диоксид кремния, так как декоративные цементные композиты с диоксидом титана имеют эстетичный вид и красивый окрас. Результаты испытаний приведены в таблицах 3–6.

Характер изменения прочности при сжатии и прочности на растяжение при изгибе различается, что подтверждает отличие в механизме разрушения (отрывной при растяжении и сдвиговый при сжатии).

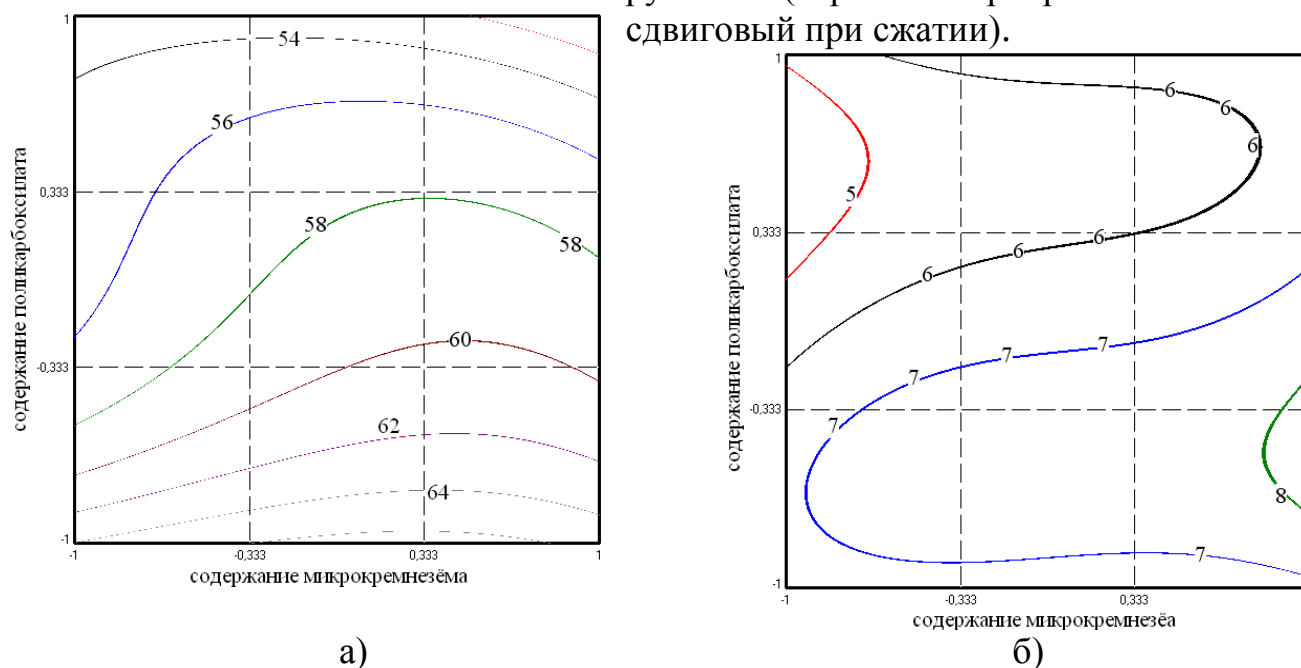


Рисунок 2 – Зависимости изменения предела прочности при сжатии (а) и на растяжение при изгибе (б) от содержания микрокремнезёма и поликарбоксилатного суперпластификатора Хидетал-ГП-9γ

Таблица 2 – Прочностные показатели цементных композитов при содержании 10 % МКУ-85 от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Содержание Sika ViscoCrete, % от массы цемента	Предел прочности при сжатии, МПа (7 суток)	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{изг}/R_{сж}$	Средняя плотность, кг/м ³
0,24	20 HE	0,4	57,84	14,75	0,255	2114
	25 RU		63,96	14,54	0,227	2101
	5 New		79,86	11,63	0,146	2144
	5 New ST		83,09	11,43	0,137	2148
0,20	20 HE	1,0	106,65	14,74	0,138	2323
	25 RU		96,05	13,02	0,136	2258
	5 New		84,91	12,82	0,151	2207
	5 New ST		81,18	10,16	0,125	2214
0,20	20 HE	1,6	85,78	14,25	0,166	2280
	25 RU		78,99	11,26	0,143	2198
	5 New		72,74	12,08	0,168	2165
	5 New ST		70,98	11,18	0,160	2088

Таблица 3 – Прочностные показатели цементных композитов при содержании 3% БС-100 и 1 % добавки Sika ViscoCrete от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$, МПа (7 суток)	Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{изг}/R_{сж}$	Средняя плотность, кг/м ³
0,24	20 HE	86,06	14,29	0,166	2083
	25 RU	77,95	11,75	0,151	2105
	5 New	81,14	11,79	0,145	2136
	5 New ST	65,95	9,36	0,142	2078

Таблица 4 – Прочностные показатели цементных композитов при содержании 1 % Аэросил А-300 и 1 % добавки Sika ViscoCrete от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ МПа (7 суток)	Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{изг}/R_{сж}$	Средняя плотность, кг/м ³
0,20	20 HE	74,00	12,72	0,172	2116
	25 RU	74,46	11,41	0,153	2097
	5 New	78,63	10,77	0,137	2145
	5 New ST	78,68	11,08	0,141	2096

Таблица 5 – Прочностные показатели цементных композитов при содержании 4 % микродисперсного кремнезёма из природного диатомита и 1 % добавки Sika ViscoCrete от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ МПа (7 суток)	Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{изг}/R_{сж}$	Средняя плотность, кг/м ³
0,25	20 HE	66,55	10,52	0,158	2036
	25 RU	55,75	8,65	0,155	2035
	5 New	57,40	7,97	0,139	2011
	5 New ST	61,60	8,11	0,132	2015

Таблица 6 – Прочностные показатели цементных композитов при содержании 10 % диоксида титана TiO_2 и 1 % добавки Sika ViscoCrete от массы цемента

В/Ц	Марка добавки Sika ViscoCrete	Предел прочности при сжатии $R_{сж}$ МПа (7 суток)	Предел прочности на растяжение при изгибе $R_{изг}$, МПа (7 суток)	$K_{тр} = R_{изг}/R_{сж}$	Средняя плотность, кг/м ³
0,18	20 HE	80,68	12,91	0,160	2323
	25 RU	80,76	11,95	0,148	2327
	5 New	66,37	11,25	0,170	2292
	5 New ST	62,25	11,13	0,179	2255

Результаты проведенных экспериментов также показали, что вид микрокремнезема оказывает существенное влияние на прочностные характеристики цементных композитов. Наиболее эффективным является применение уплотненного микрокремнезема МКУ-85. Наибольшую прочность при сжатии показал состав с содержанием МКУ-85 10 % и пластификатора Sika ViscoCrete 20 HE 1 %, взятых от массы цемента. У этого состава прочность на сжатие составила 106,65 МПа, прочность на растяжение при изгибе – 14,74 МПа, средняя плотность – 2 323 кг/м³ на седьмые сутки твердения.

Использование в качестве добавки белой сажи БС-100 понизило максимально достигнутый результат предела прочности при сжатии на 19 % относительно прочности цементных композитов с применением МКУ-85; применение аэросила А-300 сократило прочность при сжатии на 26 %; введение микродисперсного кремнезема из природного диатомита уменьшило прочность при сжатии на 38 %. Применение в качестве микрозаполнителя в цементных композитах диоксида титана (TiO₂) снизило предел прочности при сжатии до 80,68 МПа. Следует отметить, что максимальный предел прочности при сжатии состава с микрокремнеземом из природного диатомита Атемарского месторождения составил всего 66,55 МПа. Однако, учитывая дешевизну получения этого материала, его применение для изготовления бетона может быть наиболее предпочтительным.

Для того, чтобы проверить влияние химических добавок и активных минеральных наполнителей на долговечность цементных композитов, было проведено исследование по изучению стойкости цементных композиций к воздействию агрессивных сред, содержащих ионы хлора и сульфат-ионы, которым часто подвергаются изделия и конструкции из бетона.

Экспериментально была определена кинетика изменения сорбционных и прочностных характеристик цементных композитов различных составов при экспонировании в агрессивных средах. Цементные композиты подвергались агрессивному воздействию одно-, двух- и трехпроцентных водных растворов HCl и 25-процентного раствора хлорида натрия. По результатам исследования определялись основные показатели химического сопротивления цементных композитов агрессивным средам: сорбционная емкость ω_0 , коэффициенты эффективной проводимости (диффузии) D_m , коэффициент химического сопротивления $k_{x.c.}$. При экспонировании в водных растворах HCl происходит уменьшение массы образцов цементных композитов. С увеличением концентрации кислоты разрушающее действие существенно усиливается.

По данным изменения прочностных характеристик находились коэффициенты химического сопротивления. Экспериментально установлено, что в результате экспонирования цементных композитов в 1%-м растворе HCl в течение 180 суток у составов с микрокремнеземом произошло падение прочности на растяжение при изгибе на 4–28 %, прочности на сжатие –

на 8–35 %. Коррозия образцов с микрокремнеземом в 3%-м растворе HCl происходит интенсивнее, что выражается в снижении прочности на растяжение при изгибе на 23–51 % и уменьшении прочности при сжатии на 50–60 %. При выдержке образцов, содержащих добавку МКУ-85, в 25%-м растворе NaCl в течение 180 суток установлено увеличение прочности на растяжение при изгибе на 5–49 % и повышение прочности на сжатие на 6–20 %, что связано с проявлением кольматационного эффекта.

Под действием растворов, содержащих ионы хлора, в цементном композите происходит разрушение гидросиликата и гидроксида кальция с образованием геля кремниевой кислоты и хлорида кальция. Одновременно развиваются процессы выщелачивания и кольматации. Результаты испытаний показали, что процесс кольматации на начальном периоде коррозии приводит к временному повышению прочности за счет образования в порах геля кремнекислоты, который закупоривает поры, уплотняет материал и препятствует дальнейшему проникновению агрессивной среды вглубь цементного камня. По мере увеличения объема геля кремнекислоты происходит разрыв стенок пор, разрушение структуры и дальнейшее понижение прочности.

Введением в состав композита микрокремнезема и пластификатора можно управлять процессом коррозии цементного камня и замедлять процесс коррозии путем снижения скорости переноса агрессивной среды.

В процессе сульфатной коррозии бетона предложено выделять три этапа: сорбционный, который проявляется в снижении поверхностной энергии и прочности бетона при контакте с агрессивной средой; кольматационный – накопление продуктов взаимодействия; этап разрушения структуры бетона.

Предложена методика определения коэффициента диффузии агрессивной среды в цементных композитах, основанная на совместном решении уравнений Фика и Ленгмюра. Подтверждена экспериментально возможность применения сорбционного метода для определения эффективного коэффициента проводимости (диффузии) агрессивной среды и расчета глубины коррозионного повреждения образцов и изделий из цементных композитов.

Глубинный показатель a определяется по полученной из решения уравнения Фика формуле вида:

$$a = k(\xi)\sqrt{Dt}, \quad (4)$$

где $k(\xi)$ – коэффициент, величина которого зависит от задаваемой точности определения координаты; a – фронт области деградации композита.

Эффективный коэффициент проводимости субстанции D , величина которого определяется по экспериментальным данным путем их обработки с учетом функциональной зависимости, полученной из совместного решения уравнений Фика и Ленгмюра, и которая имеет вид:

$$D = k(\omega) \frac{R^2}{t_{0,5}}, \quad (5)$$

где R – характерный размер образца; $k(\omega)$ – коэффициент, зависящий от соотношения $\omega(t)/\omega_{max}$; $t_{0,5}$ – кинетическая константа, соответствующая времени, за которое сорбция агрессивной среды ω достигает величины предельной сорбционной емкости $0,5\omega_{max}$.

Значения максимальной сорбционной емкости ω_{max} и кинетическая константа $t_{0,5}$ определяются по экспериментальным кривым сорбции путем линеаризации уравнения Ленгмюра:

$$\omega(t) = \frac{\omega_{max}t}{t_{0,5}+t}; \quad \frac{1}{\omega(t)} = \frac{1}{\omega_{max}} + \left(\frac{t_{0,5}}{\omega_{max}}\right) \frac{1}{t}. \quad (6)$$

Зная предельную сорбционную емкость ω_{max} , коэффициент D можно определить из решения уравнения Фика по формуле вида:

$$D = \left[\ln \frac{8}{\pi} - \ln \frac{\omega_{max} - \omega(t)}{\omega_{max}} \right] \frac{4R^2}{\pi^2 t}. \quad (7)$$

Для оценки химического сопротивления цементных композитов предложено использовать интегральную характеристику, определяемую по формуле:

$$J = a(1 - k_{x.c.}) \quad (8)$$

Применение 3D-технологий в строительстве выдвигает на первый план проблему сокращения сроков схватывания цементных композитов, решению которой уделено внимание в пятой главе.

Результаты экспериментального исследования влияния магнитной активации на сроки схватывания и прочностные свойства цементных композитов, содержащих наполнитель в виде пиритных огарков, показали, что с увеличением напряженности магнитного поля внутри катушки сроки схватывания сокращаются.

Результаты изменения сроков схватывания цементных композитов в зависимости от напряженности магнитного поля приведены на рисунке 3. Так, под действием магнитного поля напряженностью 15 915,5 А/м (200 Э) сроки схватывания сокращаются: начало схватывания – на 30–48 %, конец схватывания – на 26–39 %. Из анализа графиков на рисунке 3 можно сделать вывод о линейной зависимости сроков схватывания от напряженности магнитного поля.

В результате исследования влияния технологических режимов магнитной активации на прочностные показатели цементных композитов, наполненных пиритными огарками, установлено, что при активации составов в магнитной камере с напряженностью 7 957,75 А/м (100 Э) в течение восьми часов с увеличением количества наполнителя до 20 % от массы цемента происходит увеличение прочности на сжатие на 41 % по сравнению с традиционной технологией. Активация в магнитной камере с той же напряженностью и длительностью активации и затем в пропарочной камере повышает прочность на сжатие на 8 %. Предел прочности на растяжение

при изгибе цементных композитов при твердении в условиях действия магнитного поля с напряженностью 7 957,75 А/м (100 Э) снижается, но с увеличением наполнения пиритными огарками незначительно (на 12 %) повышается. Однако, если твердение происходит в магнитной и пропарочной камерах, то прочность на растяжение при изгибе можно значительно (почти в два раза) повысить. Наибольшее значение прочности на сжатие (62,5 МПа) имеют образцы из наполненных цементных композитов с содержанием пиритных огарков 20 % от массы цемента при твердении в магнитном поле напряженностью 7 957,75 А/м (100 Э).

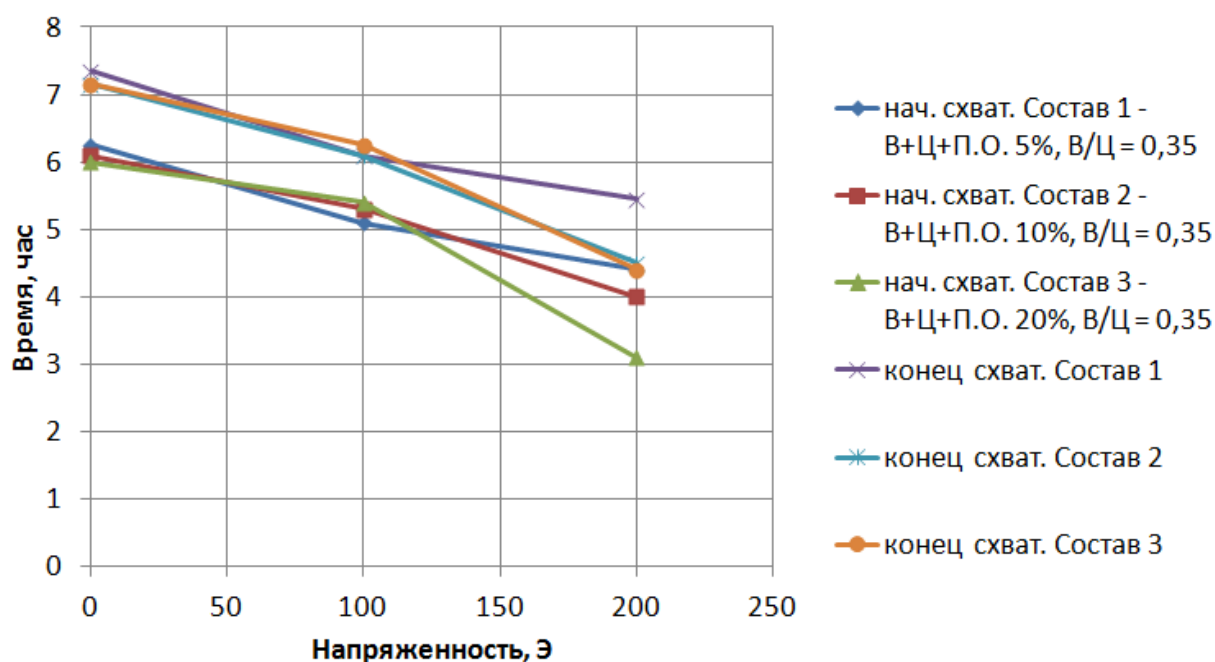


Рисунок 3 – Зависимость сроков схватывания цементных композитов от напряженности магнитного поля

При твердении в магнитной камере с напряженностью 15 915,5 А/м (200 Э) прочность наполненных цементных композитов на сжатие повышается до 67,0 МПа – на 25 % по сравнению с традиционной технологией при добавлении 5 % пиритных огарков. Дальнейшее повышение содержания наполнителя сопровождается снижением прочности на сжатие у образцов, твердевших в пульсирующем магнитном поле напряженностью 15 915,5 А/м (200 Э). Прочность на растяжение при изгибе при этом же способе активации повышается до 11,1 МПа при добавлении пиритных огарков в количестве 10 % от массы цемента. При выдержке образцов в магнитной и пропарочной камере наибольший рост прочности на сжатие зафиксирован у состава с 10%-м содержанием наполнителя (57,5 МПа). Предел прочности на растяжение при изгибе при таком режиме активации повышается до 13,7 МПа при содержании наполнителя 10 % от массы цемента и до 16,4 МПа при 20 % наполнения.

При напряженности магнитного поля 15 915,5 А/м (200 Э) наибольшее значение прочности на сжатие (67,0 МПа) получено для составов с 5%-м содержанием наполнителя, а наибольшее значение прочности на растяжение при изгибе (16,4 МПа) – для составов с 20%-м наполнением, твердевших в магнитной и пропарочной камерах.

Установлено, что влияние напряженности магнитного поля на прочность цементных композитов зависит от содержания наполнителя. Если при активации цементных композитов магнитным полем напряженностью 7 957,75 А/м (100 Э) в течение восьми часов максимальная прочность на сжатие достигается при содержании в композите наполнителя 20 %, то при напряженности магнитного поля 15 915,5 А/м (200 Э) максимальный показатель получен у составов с добавлением 5 % пиритных огарков.

Проведены экспериментальные исследования влияния напряженности магнитного поля и количества наполнителя на динамический модуль упругости цементных композитов. Образцы испытывались через сутки после выдерживания в камерах (магнитной и пропарочной) в течение восьми часов. Установлено, что при твердении образцов в магнитной камере с напряженностью 7 957,75 А/м (100 Э) и пропарочной камере, а также при твердении в магнитной, затем в пропарочной камере, происходит снижение динамического модуля упругости у образцов, содержащих 5 и 10 % наполнителя, при 20 % его содержания динамический модуль упругости увеличивается.

При напряженности магнитного поля 15 915,5 А/м (200 Э) также происходит рост динамического модуля упругости цементных композитов при повышении содержания наполнителя до 20 % от массы цемента. С 20%-м содержанием наполнителя с увеличением напряженности магнитного поля с 7 957,75 А/м (100 Э) до 15 915,5 А/м (200 Э) происходит увеличение динамического модуля упругости на 18 %.

Экспериментальными исследованиями по определению зависимости динамического модуля упругости от количества наполнителя и длительности твердения образцов установлено, что оптимальным является 5%-е наполнение цементных композитов. Модуль упругости на 28 сутки достигает максимальной величины – 16 461 МПа, что свидетельствует о формировании однородной структуры. Повышение модуля упругости с увеличением степени наполнения после одних суток твердения свидетельствует о том, что процесс структурообразования находится на начальной стадии, и величина модуля упругости адекватна (по правилу смесей) относительному содержанию компонентов ($E = \sum E_i \gamma_i$). Для составов цементных композитов с содержанием наполнителя 10 и 20 % от массы цемента нарастание динамического модуля упругости во времени имеет зависимость, близкую к логарифмической, а для составов без наполнения и с 5%-м наполнением пиритными огарками зависимость имеет почти линейный характер.

Были проведены исследования по выявлению закономерностей совместного влияния водных растворов серной кислоты разной концентрации и магнитных полей на свойства цементных композитов. Напряженность магнитного поля в процессе эксперимента составляла 15 915,5 А/м (200 Э). Анализ экспериментальных данных показал, что при экспонировании образцов в 2%-м растворе серной кислоты в течение 48 часов прочность на сжатие снизилась на 9 %, прочность на растяжение при изгибе повысилась на 37 %. При экспонировании составов в воде и 4%-й серной кислоте в течение трех часов происходит рост прочности на сжатие на 27 и 23 % соответственно. После 48 часов выдержки в воде прочность на сжатие увеличилась на 14 %, а в 4%-м растворе серной кислоты уменьшилась на 21 %. Прочность на растяжение при изгибе растёт на всем протяжении экспонирования (48 часов), что можно объяснить проявлением кольматационного эффекта.

Динамический модуль упругости при экспонировании образцов в течение 48 часов в воде повышается на 15 %; в 4%-м растворе H_2SO_4 – на 7 %; в 2%-м растворе H_2SO_4 – на 11 %. Это явление объясняется сорбцией влаги в объем образца, что приводит к увеличению скорости прохождения ультразвука.

Совместное действие водного раствора серной кислоты и магнитного поля интенсифицирует процесс деградации наполненных цементных композитов.

Прочность на сжатие композитов с содержанием 10 % от массы цемента пиритных огарков при выдержке в воде в течение 48 часов повышается на 20 %. При совместном действии магнитного поля и 4%-го и 2%-го растворов серной кислоты прочность на сжатие уменьшается соответственно на 33 и 12 %.

Динамический модуль упругости цементных композитов без наполнителя при совместном действии воды и магнитного поля напряженностью 15 915,5 А/м (200 Э) в течение 48 часов понижается на 5 %.

Повышение однородности структуры под действием магнитного поля сопровождается увеличением предела прочности и динамического модуля упругости цементных композитов. Применение магниточувствительного наполнителя и активации процесса твердения цементных композитов магнитным полем позволяют получать цементные композиты с более однородной структурой, повышенной прочностью и экономить цемент без ухудшения конструктивных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана на основе теорий прочности Гриффитса и Кулона – Навье модель разрушения цементных композитов, из анализа которой сле-

дует: разрушение структуры бетона происходит вследствие развития трещины, при этом наиболее неблагоприятной ориентацией трещины является расположение ее к направлению силовых линий под углом 90° при растяжении и 45° при сжатии; между прочностью бетона при сжатии, прочностью при растяжении и коэффициентом трения бетона о бетон существует корреляционная зависимость, вид которой определен аналитически и адекватность подтверждена экспериментальными данными; коэффициент трения бетона о бетон изменяется в пределах $0 < \gamma < 1$ и его величина коррелируется с классом бетона по прочности на сжатие прямо пропорциональной зависимостью.

2. Выявлены закономерности воздействия водных растворов, содержащих ионы хлора и сульфат-ионы, на высокопрочные цементные композиты. Установлено, что на начальном этапе коррозии заметно проявление кольматационного эффекта и, как следствие, – временное повышение прочности, но после 28 суток взаимодействия цементных композитов с водными растворами соляной и серной кислот наблюдается разрушение структуры и падение прочности. При взаимодействии цементных композитов с раствором NaCl кольматационный эффект более продолжителен. Экспериментально установлено, что введением в состав цементных композитов пластифицирующих добавок и тонкодисперсных минеральных наполнителей, содержащих диоксид кремния, можно замедлить процесс коррозии и повысить химическое сопротивление и прочность цементных композитов. Разработаны на основе законов Гульдберга – Вааге, Фика и Ленгмюра методы определения кинетических характеристик химического сопротивления (предельная сорбционная емкость, коэффициент диффузии, коэффициент химического сопротивления). Предложена интегральная характеристика на основе теории экстремальных экспериментов для оценки химического сопротивления цементных композитов.

3. Оптимизированы с применением полиномиальных моделей технологические режимы химической активации, позволяющие на основе цементных вяжущих, наполненных микрокремнеземом и модифицированных суперпластификаторами поликарбоксилатного типа, получить композиты с прочностью на сжатие свыше 100 МПа на седьмые сутки твердения.

4. Установлены морфологические характеристики частиц микрокремнезёма, полученного из диатомита Атемарского месторождения, топографические и фрактальные параметры их поверхности, объясняющие его высокую реакционную активность, что позволяет использовать этот полидисперсный материал как активную добавку к сухим строительным смесям и цементным композитам.

5. Установлены оптимальные режимы магнитной активации цементных композиций, позволяющие повышать (до 30 %) прочность композитов, сокращать сроки их схватывания (начала схватывания на 30–48 %, конца схватывания на 26–39 %).

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Полученный золь-методом из диатомита Атемарского месторождения порошок микрокремнезема является продуктом многоцелевого назначения и может быть использован как активная добавка к сухим строительным смесям и цементным композитам, как компонент общестроительных и специальных бетонов, в качестве теплоизолирующих засыпок и наполнителя VIP-панелей, для изготовления красок и сорбентов.

Разработанные составы цементных композиций с поликарбонатными суперпластификаторами и активными минеральными наполнителями применимы для изготовления высокопрочных бетонов. Выявленные оптимальные режимы активации наполненных цементных композитов магнитным полем создают основу для дальнейшего развития научных направлений по изучению методов управления формированием структуры материала на микро- и наноуровнях.

Сокращение сроков схватывания цементных композитов под действием магнитного поля позволяет минимизировать длительность твердения, при этом получать высокопрочные бетоны, что свидетельствует о необходимости развития исследований в этом направлении для создания 3D-технологий изготовления изделий из бетона.

Результаты диссертационного исследования помогают расширить методологический базис в строительном материаловедении, а также могут быть применимы в учебном процессе.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных изданиях

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Селяев, В. П. Влияние сил трения на прочность бетона [Текст] / В. П. Селяев, П. В. Селяев, Е. В. Сорокин, А. В. Колотушкин, Е. Л. Кечуткина // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3(14). – С. 12-17. (ИФ РИНЦ 0,551; 0,75/0,15)

2. Селяев, В. П. Цементные композиции для высокопрочных бетонов [Текст] / В. П. Селяев, А. Н. Лукин, А. В. Колотушкин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3(17). – С. 4-8. (ИФ РИНЦ 0,551; 0,62/0,21)

3. Селяев, В. П. Микроструктура перспективных теплоизоляционных материалов на основе диатомитов Среднего Поволжья [Текст] / В. П. Селяев, В. А. Неверов, Л. И. Куприяшкина, А. В. Колотушкин, В. В. Сидоров // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 1(15). – С. 12-17. (ИФ РИНЦ 0,551; 0,75/0,15)

4. Селяев, В. П. Свойства микрокремнезема из природного диатомита и его применение в производстве вакуумных теплоизоляционных панелей [Текст] / В. П. Селяев, В. А. Неверов, О. Г. Маштаев,

А. В. Колотушкин // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – №7 (42). – С. 15-25. (ИФ РИНЦ 1,602; 1,37/0,34)

5. Селяев, В. П. Влияние магнитной активации на упругопрочностные показатели цементных композитов [Текст] / В. П. Селяев, А. В. Колотушкин // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 2(27). – С. 17-20. (ИФ РИНЦ 0,551; 0,50/0,25)

6. Селяев, В. П. Химическое сопротивление цементных композитов действию водных растворов, содержащих ионы хлора [Текст] / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, А. А. Седова, П. В. Селяев, А. В. Колотушкин // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 1(30). – С. 17-24. (ИФ РИНЦ 0,551; 1,00/0,20)

7. Селяев, В. П. Влияние наполнителей и пластификаторов на химическое сопротивление цементных композитов водным растворам, содержащим ионы хлора [Текст] / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов, А. В. Колотушкин, Е. Л. Кечуткина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 1(34). – С. 14-22. (ИФ РИНЦ 0,551; 1,12/0,23)

8. Селяев, В. П. Влияние наполнителей на химическое сопротивление цементных композитов водным растворам, содержащим сульфат-ионы [Текст] / В. П. Селяев, П. В. Селяев, А. В. Колотушкин, Е. Л. Кечуткина // Региональная архитектура и строительство. – 2018. – № 1(34). – С. 23-31. (ИФ РИНЦ 0,551; 1,03/0,26)

Публикации в других изданиях:

9. Колотушкин, А. В. Влияние магнитной обработки воды на характеристики бетона / А. В. Колотушкин // Актуальные вопросы строительства : Материалы Международной научно-технической конференции – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – Ч.1. – С. 108–109.

10. Лукин, А. Н. Активация вяжущих систем / А. Н. Лукин, А. В. Колотушкин // Актуальные вопросы строительства : материалы десятой Международной научно-технической конференции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. – С.178–183.

11. Лукин, А. Н. Особенности воздействия раствора соляной кислоты на бетон / А. Н. Лукин, А. В. Колотушкин // Актуальные вопросы строительства : материалы десятой Международной научно-технической конференции. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. – С.283–286.

12. Селяев, В. П. Механика разрушения материалов со структурой конгломератного типа / В. П. Селяев, П. В. Селяев, Е. В. Сорокин, А. В. Колотушкин // Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2012 году : сборник научных трудов. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2013. – С. 387–391.

13. Колотушкин, А. В. Подбор высокопрочных бетонов / А. В. Колотушкин // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы

двенадцатой Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 190–192.

14. Колотушкин, А. В. Электромагнитная активация цементных композиций / А. В. Колотушкин // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы двенадцатой Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 192–194.

15. Колотушкин, А. В. Коэффициент трения бетона / А. В. Колотушкин // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы двенадцатой Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 269–271.

16. Селяев, В. П. Исследование стойкости цементных композиций к воздействию агрессивных сред / В. П. Селяев, А. Н. Лукин, А. В. Колотушкин // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию заслуж. деятеля науки Рос. Федерации, акад. РААСН, д-ра техн. наук проф. Владимира Павловича Селяева. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 195–203.

17. Селяев, В. П. Разработка и оптимизация составов цементных вяжущих для высокопрочных бетонов / В. П. Селяев, А. Н. Лукин, А. В. Колотушкин // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию заслуж. деятеля науки Рос. Федерации, акад. РААСН, д-ра техн. наук проф. Владимира Павловича Селяева. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 204–209.

18. Лукин, А. Н. Исследование прочности цементных композиций под воздействием магнитного поля / А. Н. Лукин, А. В. Колотушкин, В. М. Родин // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию заслуж. деятеля науки Рос. Федерации, акад. РААСН, д-ра техн. наук проф. Владимира Павловича Селяева. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 66–69.

19. Киселёв, Н. Н. Преимущества и возможности применения сверхпрочных бетонов / Н. Н. Киселёв, А. В. Колотушкин, А. Н. Лукин, В. П. Селяев // Актуальные вопросы строительства : материалы тринадцатой Международной научно-технической конференции. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Ч.1. – С. 27–31.

20. Колотушкин, А. В. Исследование зависимости прочностных характеристик бетона от крупности мелкого заполнителя при использовании различных гиперпластификаторов в сочетании с мелкодисперсными добавками / А. В. Колотушкин, Н. Н. Киселёв, А. Н. Лукин, В. П. Селяев // Актуальные вопросы строительства : материалы тринадцатой Международной научно-технической конференции. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – Ч.1. – С. 31–34.

Подписано в печать 25.04.19. Объем 1,5 п. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 753.
Типография Издательства Мордовского университета
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24