

На правах рукописи



БАЛБАЛИН АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ
СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза 2015

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Низина Татьяна Анатольевна

Официальные оппоненты: **Акулова Марина Владимировна**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный
политехнический университет»,
заведующий кафедрой «Строительное
материаловедение, специальные технологии
и технологические комплексы»

Макарова Людмила Викторовна
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства»,
доцент кафедры «Управление качеством
и технологии строительного производства»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный
технологический университет имени
В.Г. Шухова»

Защита состоится 1 октября 2015 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/d-212-184-01/56-31-balbalin-aleksey-vladimirovich>.

Автореферат разослан 1 августа 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бакушев
Сергей Васильевич

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Для различных видов строительных работ требуются бетоны и цементные растворы, отвечающие различным, порой специфическим, требованиям по прочности, водонепроницаемости, стойкости к действию агрессивных сред и т.п. Разнообразить номенклатуру выпускаемых цементных растворов и мелкозернистых бетонов, в том числе, на основе сухих строительных смесей (ССС), помогают многочисленные добавки, позволяющие достигать требуемых характеристик с одновременным снижением расхода цемента и обеспечением комплекса высоких эксплуатационных характеристик.

В последние годы для повышения плотности, долговечности, морозостойкости и коррозионной стойкости цементных растворов и бетонов на основе ССС все чаще применяют минеральные добавки (МД), в частности микрокремнезем и метакаолин. Введение активных минеральных добавок в бетоны и растворы различного назначения неминуемо сопряжено с необходимостью применения высокоэффективных добавок (пластификаторов) для регулирования реологических свойств в связи с высокой тонкостью помола МД и, соответственно, развитой поверхностью зерен минерального порошка. Наибольшей эффективностью среди таких добавок обладают суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе. При этом эффективность совместного применения минеральных и пластифицирующих добавок в составах сухих строительных смесей существенно зависит от их вида и концентрации, что требует проведения комплексных научных исследований.

Работа выполнялась в рамках фундаментальной НИР №53/10-12 «Исследование процессов формирования наноструктуры теплоизоляционных материалов на основе минеральных частиц».

Степень разработанности темы исследования. При выполнении диссертационной работы был проведен литературный научно-технический обзор по технологии получения, режимам механоактивации, видам минеральных и пластифицирующих добавок, используемых в составах ССС. Теоретическими основами работы стали исследования отечественных и зарубежных ученых, посвященных вопросам структурообразования, технологии получения и оптимизации составов ССС, способов модифицирования вяжущих дисперсных систем и бетонов пластифицирующими и минеральными добавками и изучению их свойств: М.В. Акуловой, Ю.М. Баженова, В.Г. Батракова, Г.И. Горчакова, В.С. Демьяновой, Л.И. Дворкина, В.Т. Ерофеева, В.И. Калашникова, П.Г. Комохова, В.С. Лесовика, В.И. Логаниной, О.П. Мчедлова-Петросяна, Л.Б. Сватовской, В.П. Селяева, В.И. Соломатова, В.В. Строковой, М.И. Хигеровича, А.Е. Шейкина, С.В. Федосова, Е.М. Чернышова, Т. Беккера, Р. Кондо, С. Нагатака, В. Рамачадрана, Д.М. Роя, К. Хаттори, И. Ямото и др.

В работах, выполненных ранее, была доказана эффективность использования минеральных и пластифицирующих добавок для повышения свойств цементных композитов. Однако вопросы разработки комплексных модификаторов на основе мелкодисперсных минеральных порошков и поликарбоксилатных пластификаторов изучены не достаточно полно. В связи с этим разработка составов полифункциональных модификаторов, а также технологии получения и

оптимизации модифицированных комплексными добавками сухих строительных смесей, композиты на основе которых обладают повышенными технологическими и эксплуатационными характеристиками, является актуальной задачей строительного материаловедения.

Цели и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка технологии получения и оптимизация составов сухих строительных смесей с комплексными модификаторами, композиты на основе которых обладают повышенными технологическими и эксплуатационными показателями.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Обосновать целесообразность использования полифункциональных добавок, позволяющих решать комплекс технологических задач и получать композиты на основе ССС с необходимыми эксплуатационными характеристиками.

2. Провести анализ технологических и эксплуатационных характеристик цементных композитов, модифицированных минеральными и пластифицирующими добавками.

3. Изучить влияние механической активации на свойства цементных композитов с полифункциональными добавками.

4. Разработать и оптимизировать составы композиционных цементных вяжущих и композитов на основе ССС, содержащих комплексные модификаторы, с позиций обеспечения комплекса повышенных свойств.

5. Изучить кинетику твердения цементных композитов с полифункциональными модификаторами на основе минеральных и пластифицирующих добавок.

6. Провести опытно-промышленное апробирование разработанных составов сухих строительных смесей; разработать нормативную документацию на производство ССС на основе комплексных добавок и рекомендаций по их использованию.

Научная новизна исследования.

Установлены закономерности комплексного влияния пластифицирующей (Melflux 1641 F) и минеральных добавок 4 видов (микрокремнеземы конденсированные неуплотненный и уплотненный Новокузнецкие МК-85 и МКУ-85, микрокремнезем неуплотненный Братский МК-85 и метакаолин) на водопотребность и загущающую способность цементных вяжущих. Получены зависимости, описывающие скорость набора пластической прочности модифицированных цементных композиций в процессе твердения. Установлена возможность регулирования скорости процесса гидратации путем варьирования соотношения минеральных добавок и поликарбоксилатного пластификатора Melflux 1641 F, позволяющая продлевать жизнеспособность смеси на 1 ÷ 3 ч.

Разработаны экспериментально-статистические модели изменения упругопрочностных характеристик цементных композитов на основе ССС. Предложен номограммный метод графической интерпретации результатов многофакторных экспериментальных исследований композиционных строительных материалов.

Выявлены закономерности влияния механической активации составов ССС с полифункциональными модификаторами на свойства цементных компо-

зитов на их основе. Установлено влияние комплексных модификаторов на изменение упруго-прочностных и адгезионных характеристик, а также поровую структуру цементных композитов. Выявлено, что наименьшей пористостью и, как следствие, наиболее высокими прочностными показателями обладают цементные композиты, содержащие комплексные добавки с метакаолином и микрокремнеземом Новокузнецким неуплотненным.

Разработана методика фрактального анализа кривых деформирования композиционных материалов при сжатии, позволяющая определять точки «критических» состояний композита в процессе нагружения. Определены положения «критических» точек кривых деформирования модифицированных цементных композитов, характеризующих: зарождение в структуре первых микротрещин; начало процесса интенсивного образования микро- и макродефектов; момент формирования макротрещин, приводящих к лавинообразному разрушению образца.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В диссертации изложены научно-обоснованные технические и технологические решения получения цементных композитов с полифункциональными модификаторами на основе минеральных и пластифицирующих добавок, обладающие комплексом свойств, позволяющих отнести их к составам общестроительного назначения. Теоретическая значимость работы состоит в использовании фундаментальных научных исследований в области структурообразования модифицированных композиционных материалов на основе цементных вяжущих, в том числе сухих строительных смесей.

Разработаны и оптимизированы составы ССС с комплексными модификаторами на основе поликарбоксилатного суперпластификатора Melflux 1641 F и минеральных добавок, а также режимы их механической активации, позволяющие получать композиты со следующими характеристиками: предел прочности при сжатии $44,3 \div 56,9$ МПа; водоудерживающая способность $98 \div 99\%$; адгезионная прочность $0,69 \div 1,04$ МПа; водопоглощение по массе $5,8 \div 9,1\%$; объем открытых капиллярных пор $10,9 \div 15,2\%$. Разработанные составы ССС соответствуют маркам по подвижности $P_{к2} \div P_{к3}$ и морозостойкости $F75 \div F300$.

Разработана технологическая схема производства составов ССС с полифункциональными модификаторами на основе минеральных и пластифицирующих добавок и проект стандарта организации «Смеси сухие строительные. Технические условия».

Методология и методы диссертационного исследования.

Методологической основой диссертационного исследования послужили современные положения теории и практики создания сухих строительных смесей на основе модифицированных комплексными добавками цементных вяжущих. При проведении научных исследований использовались стандартные средства измерений и методы исследования физико-механических характеристик цементных композитов, полученных с использованием современного испытательного оборудования.

Положения, выносимые на защиту:

– закономерности изменения технологических и эксплуатационных характеристик модифицированных цементных вяжущих и композитов на основе

ССС в зависимости от вида и концентрации полифункциональных добавок, П/Ц отношения и режима механической активации компонентов;

– теоретические и экспериментальные результаты исследования механизма разрушения строительных композиционных материалов на основе методов фрактального анализа;

– составы сухих строительных смесей с полифункциональными модификаторами, композиты на основе которых обладают комплексом улучшенных свойств.

Достоверность результатов диссертационного исследования и выводов по работе работы подтверждена сходимостью большого числа экспериментальных данных, полученных с применением комплекса стандартных и высокоинформативных методов исследования, их непротиворечивостью известным закономерностям. Выводы и рекомендации работы получили положительную апробацию и внедрение в строительной практике.

Внедрение результатов исследований.

Апробация полученных результатов в промышленных условиях осуществлялась в ООО «Инжиниринговая конструкторская компания» (г. Саранск).

Теоретические положения диссертационной работы, а также результаты экспериментальных исследований используются в учебном вопросе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 270800 «Строительство» по профилям «Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство и хозяйство».

Апробация результатов.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: научно-технических семинарах кафедры «Строительные конструкции» МГУ имени Н.П. Огарёва (г. Саранск); международных научно-технических конференциях: «Проблемы современного бетона и железобетона» (г. Минск, 2011), «Актуальные вопросы строительства» (г. Саранск, 2011 – 2013); «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (г. Тула, 2011 – 2012); «Строительство-2012» (г. Ростов-на-Дону, 2012); «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона» (г. Саратов, 2012 – 2014); «Разработка эффективных авиационных, промышленных, электротехнических и строительных материалов и исследование их долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов» (г. Саранск, 2013), «Теория и практика повышения эффективности строительных материалов» (г. Пенза, 2013 – 2014), «Архитектура и строительство Казахстана в условиях глобальной интеграции» (г. Алматы, 2015). Статьи были опубликованы в журналах: «Вестник ТГАСУ» (г. Томск, 2012), «Региональная архитектура и строительство» (г. Пенза, 2013), «Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура» (г. Волгоград, 2013).

Личный вклад автора состоит в разработке составов сухих строительных смесей на основе комплексных модификаторов, получении результатов исследований, их обобщении и анализе.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 статей, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 219 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 164 наименований и 2 приложения.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Строительные конструкции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» в соответствии с паспортом специальности 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» и, в частности, с формулой специальности «Строительные материалы и изделия – область науки и техники, занимающаяся разработкой научных основ получения строительных материалов различного назначения и природы, включающая выбор сырья, проектирование состава, управление физико-химическими процессами структурообразования и технологией, обеспечивающими высокие эксплуатационные свойства изделий и конструкций при механическом нагружении и воздействии окружающей среды» и пунктом области исследования: п. 16. Развитие теоретических основ и технологии получения сухих строительных смесей различного назначения.

Автор выражает глубокую благодарность академику РААСН, д-ру техн. наук, профессору В.П. Селяеву, ген. директору ЗАО «НТЦ прикладных нанотехнологий», к.т.н., профессору Санкт-Петербургского государственного политехнического университета А.Н. Пономарёву, с.н.с. ЗАО «НТЦ прикладных нанотехнологий» А.А. Козееву за оказанную помощь и научные консультации по диссертационной работе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На сегодняшний день технология изготовления строительных растворов уже давно отошла от классического варианта, когда требуемые характеристики обеспечивались исключительно подбором компонентного состава: вяжущего, наполнителей, заполнителей. В настоящее время требуемых технологических и эксплуатационных характеристик достигают за счет применения целой группы модифицирующих добавок, позволяющих получить необходимый эффект. Применение комплексных модификаторов позволяет максимально использовать положительные и устранить отрицательные свойства индивидуальных добавок. Правильно сочетая типы и количественные соотношения добавок можно направленно регулировать структуру и, соответственно, физико-механические свойства цементного камня, что в совокупности приводит к повышению эксплуатационных характеристик бетонов и растворов.

Литературный обзор исследований отечественных и зарубежных авторов, посвященных вопросам структурообразования, технологии получения и оптимизации составов ССС, способов модифицирования вяжущих дисперсных систем пластифицирующими и минеральными добавками показал, что введение комплексных модификаторов на основе минеральных тонкодисперсных наполнителей различной химической природы и удельной поверхности и высококачественных поликарбонатных пластификаторов является одним из суще-

ственных резервов повышения свойств и снижения себестоимости сухих строительных смесей. Применение механической активации вяжущих веществ с полифункциональными добавками также является перспективным направлением улучшения технологических и эксплуатационных характеристик ССС. Показано, что в качестве минеральных компонентов полифункциональных добавок для существенного уменьшения расхода цемента наиболее перспективно использовать метаксаолин и микрокремнезем различных видов.

Для проведения экспериментальных исследований влияния вида и содержания МД на упруго-прочностные показатели цементных вяжущих был разработан пятифакторный план; в качестве варьируемых факторов были выбраны 4 вида минеральных добавок:

- микрокремнезем конденсированный неуплотненный МК-85 (ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк, ТУ 5743–048–02495332–96) – МК 1;
- микрокремнезем конденсированный уплотненный МКУ-85 (ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк, ТУ 5743–048–02495332–96) – МК 2;
- микрокремнезем неуплотненный МК-85 (ОАО «Братский алюминиевый завод», ТУ 5743–048–02495332–96) – МК 3;
- метаксаолин (ТУ 572901–001–65767184–2010) – ВМК.

Для обеспечения необходимых реологических свойств в состав вводился пластификатор производства BASF Constraction Polymers, Trostberg (Германия), относящийся к I-ой группе пластифицирующих добавок – поликарбоксилатный суперпластификатор Melflux1641 F. В качестве вяжущего при изготовлении цементных композитов использовался портландцемент без минеральных добавок марки ЦЕМ I 42,5Б ГОСТ 31108-2003 производства ОАО «Мордовцемент» (Россия, Республика Мордовия, Чамзинский район, посёлок Комсомольский). В работе использовался речной песок с размером зерна менее 5 мм, добываемый в посёлке Смольный Ичалковского района Республики Мордовия. Модуль крупности песка составляет $M_k=1,51$, что согласно ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ» соответствует группе мелких песков.

В качестве контрольного был принят цементный раствор с В/Ц=0.27. Содержание всех видов микрокремнезема составляло 5, 10 и 15 %, метаксаолина – 1, 3, 5 % от массы вяжущего, вводимого взамен цемента; содержание суперпластификатора Melflux1641 F составляло 0.4 и 0.8% от массы вяжущего.

В ходе исследования изучалось изменение нормальной густоты, плотности и прочности при сжатии в возрасте 7 и 28 суток. По результатам обработки экспериментальных исследований получены коэффициенты полиномиальных уравнений и проведен их анализ. Установлено, что введение в состав цементных композиций минеральных добавок, обладающих достаточно высокой удельной поверхностью, приводит к значительному повышению водопотребности, что наиболее ярко проявляется для составов, содержащих Новокузнецкий гранулированный или Братский микрокремнезем. Введение пластификатора Melflux 1641 F в количестве $0,4 \div 0,8\%$ от массы вяжущего позволяет снизить водопотребность наполненных МД составов до 40%.

Наибольший эффект от введения пластификатора для составов с микрокремнеземом Новокузнецким неуплотненным наблюдается (в зависимости от расхода добавки) в интервале от $0.25 \div 0.4\%$ до $0.65 \div 0.75\%$ от массы вяжущего.

Несмотря на высокие абсолютные значения водопотребности для составов с Братским микрокремнеземом, обладающим значительной удельной поверхностью, введение суперпластификатора позволяет получить хороший водоредуцирующий эффект. Как следствие, повышенная водопотребность составов без пластификаторов с высоким содержанием МД ведет к падению плотности и предела прочности цементного камня (рис. 1). Оптимальные составы по прочностным показателям (предел прочности при сжатии больше 80 МПа) получены при введении от 6 до 15% микрокремнезема Новокузнецкого неуплотненного и содержании пластификатора 0.4÷0.6% от массы вяжущего (рис. 1, а). Наилучший результат получен для композитов с содержанием 2÷4.5% метаксаолина и 0.2÷0.6% Melflux 1641 F от массы вяжущего. Для данного вида минеральной добавки предел прочности при сжатии в зоне оптимума превышает 90 МПа (рис. 1, г).

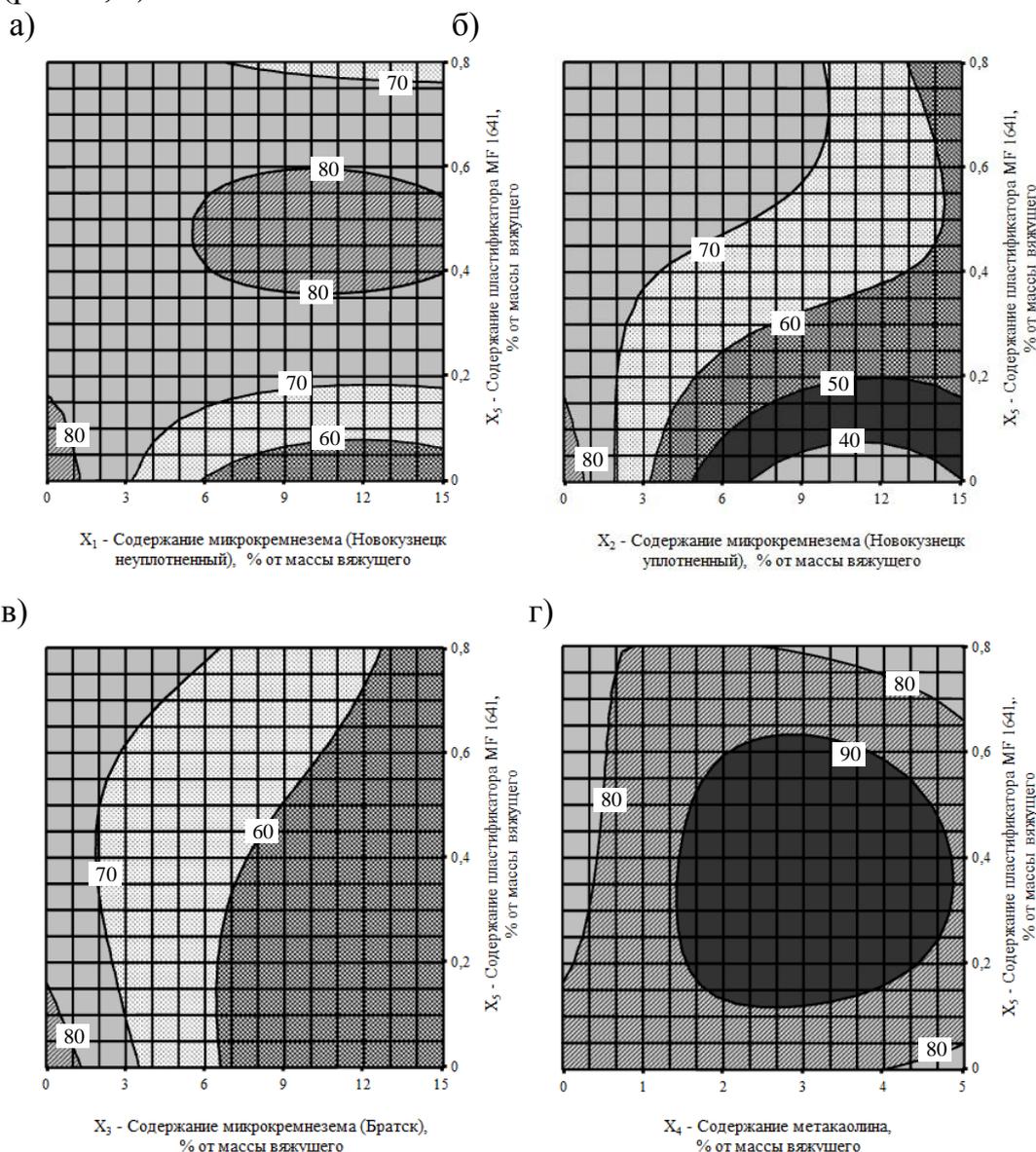


Рис. 1. Изолинии изменения предела прочности при сжатии (МПа, 28 суток) цементных композитов с минеральными добавками (а – микрокремнезем Новокузнецкий неуплотненный; б – микрокремнезем Новокузнецкий уплотненный; в – микрокремнезем Братский; г – метаксаолин)

По результатам экспериментальных исследований был проведен анализ доли предела прочности при сжатии в возрасте 7 суток по отношению к марочной прочности. Установлено, что ряд цементных композитов с Братским микрокремнеземом и метаксаолином достигают 98% проектной прочности уже к 7 суткам твердения. Для композитов с 2 видами Новокузнецкого микрокремнезема максимальные значения данной характеристики составляют, соответственно, для уплотненной и уплотненной минеральных добавок 86 и 93%.

По результатам проведенных исследований установлено, что введение микрокремнезема трех исследуемых видов приводит к существенному снижению плотности (рис. 2). Введение пластификатора Melflux 1641 F нивелирует данный эффект, причем для составов с МК 2 и МК 3 наибольшее положительное влияние на плотность проявляется при его использовании в количестве 0.8%, а для МК1 и ВМК – 0.4% от массы вяжущего. Для цементных композитов, модифицированных полифункциональными добавками на основе МК 1 и ВМК, выявлены области с более высокой плотностью, превышающей аналогичный показатель для контрольного состава (рис. 2). В обоих случаях наилучшие значения достигнуты при содержании пластификатора $0.4 \div 0.55\%$.

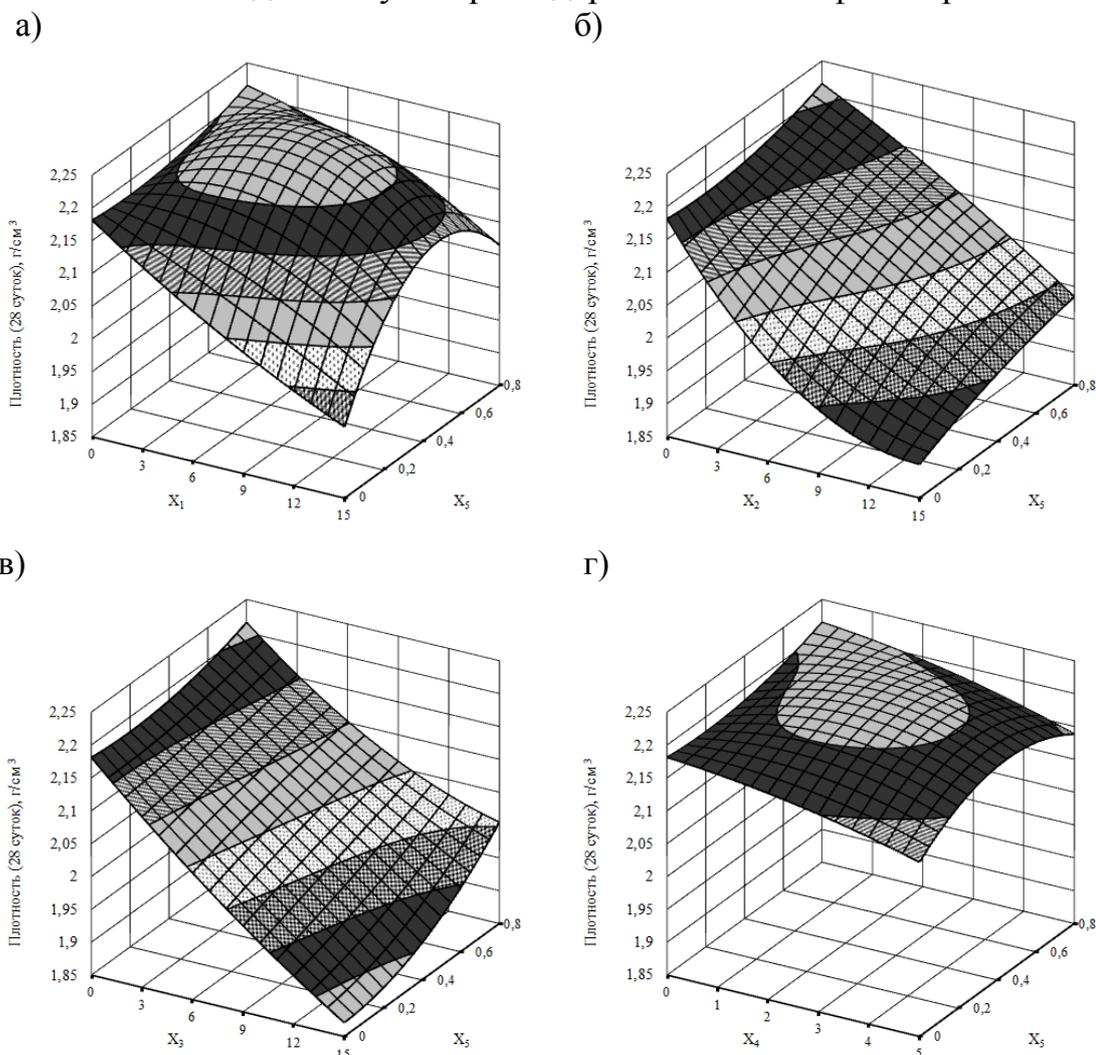


Рис. 2. Изолинии изменения плотности (г/см^3 , 28 суток) цементных композитов с минеральными добавками в равновесно-влажностном состоянии (а – микрокремнезем Новокузнецкий уплотненный; б – микрокремнезем Новокузнецкий уплотненный; в – микрокремнезем Братский; г – метаксаолин)

Для анализа поровой структуры разработанных составов были проведены экспериментальные исследования кинетики водопоглощения в соответствии с методикой ГОСТ 12730. Анализ водопоглощения показал (рис. 3), что наибольший прирост массы при экспонировании образцов в воде наблюдается для цементных композитов с Братским микрокремнеземом. Установлено влияние комплексных модификаторов на основе минеральных добавок и поликарбонатного пластификатора на изменение поровой структуры цементного камня. Выявлено, что наименьшее влияние на процесс порообразования оказывает введение ВМК и МК 1.

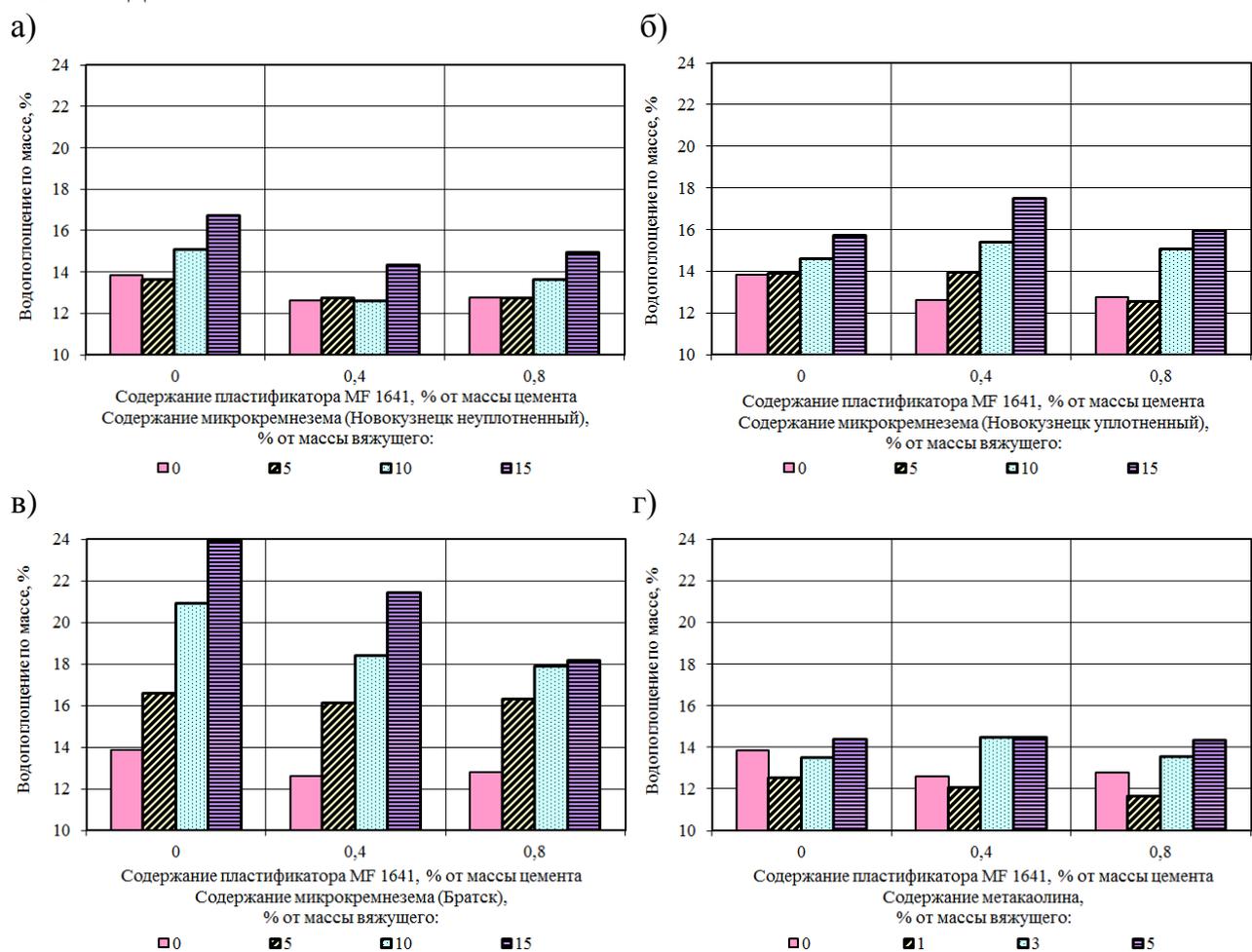


Рис. 3. Гистограммы изменения водопоглощения по массе цементных композитов с МД (а – микрокремнезем Новокузнецкий неуплотненный; б – микрокремнезем Новокузнецкий уплотненный; в – микрокремнезем Братский; г – метакаолин)

Для цементных композитов, содержащих до 9% микрокремнезема Новокузнецкого неуплотненного от массы вяжущего, наблюдается снижение объема открытых капиллярных пор по сравнению с контрольным для всего исследуемого диапазона Melflux 1641 F. Установлена возможность увеличения содержания данной минеральной добавки в составе цементного вяжущего до 12% без ухудшения данного показателя при дополнительном введении пластификатора в количестве не менее 0.4%. При использовании уплотненного микрокремнезема того же производителя наибольшей открытой капиллярной пористостью обладают цементные композиты с содержанием МК 2 более 10%, причем эффективность от введения пластификатора в данном случае начинает проявляться лишь при максимальном содержании Melflux 1641 F (0.8% от массы вяжущего).

Введение комплексных добавок на основе метакеолина приводит к снижению открытой капиллярной пористости и среднего размера пор, а также увеличению равномерности распределения пор по объему. Совокупность этих факторов способствует повышению эксплуатационных качеств растворов.

В ходе экспериментальных исследований была изучена кинетика твердения равноподвижных составов цементного теста. Для построения обобщающей кривой нарастания пластической прочности (рис. 4) в процессе твердения использовалась зависимость вида:

$$P_m = P_{m0} + v_1 \cdot T + A \cdot \exp\left(\frac{T - T_k}{T_3}\right), \quad (1)$$

где P_{m0} – начальная пластическая прочность; v_1 – скорость набора пластической прочности на первоначальном этапе твердения; T – текущее время твердения; A , T_k , T_3 – параметры уравнения, характеризующие скорость набора пластической прочности на втором этапе твердения.

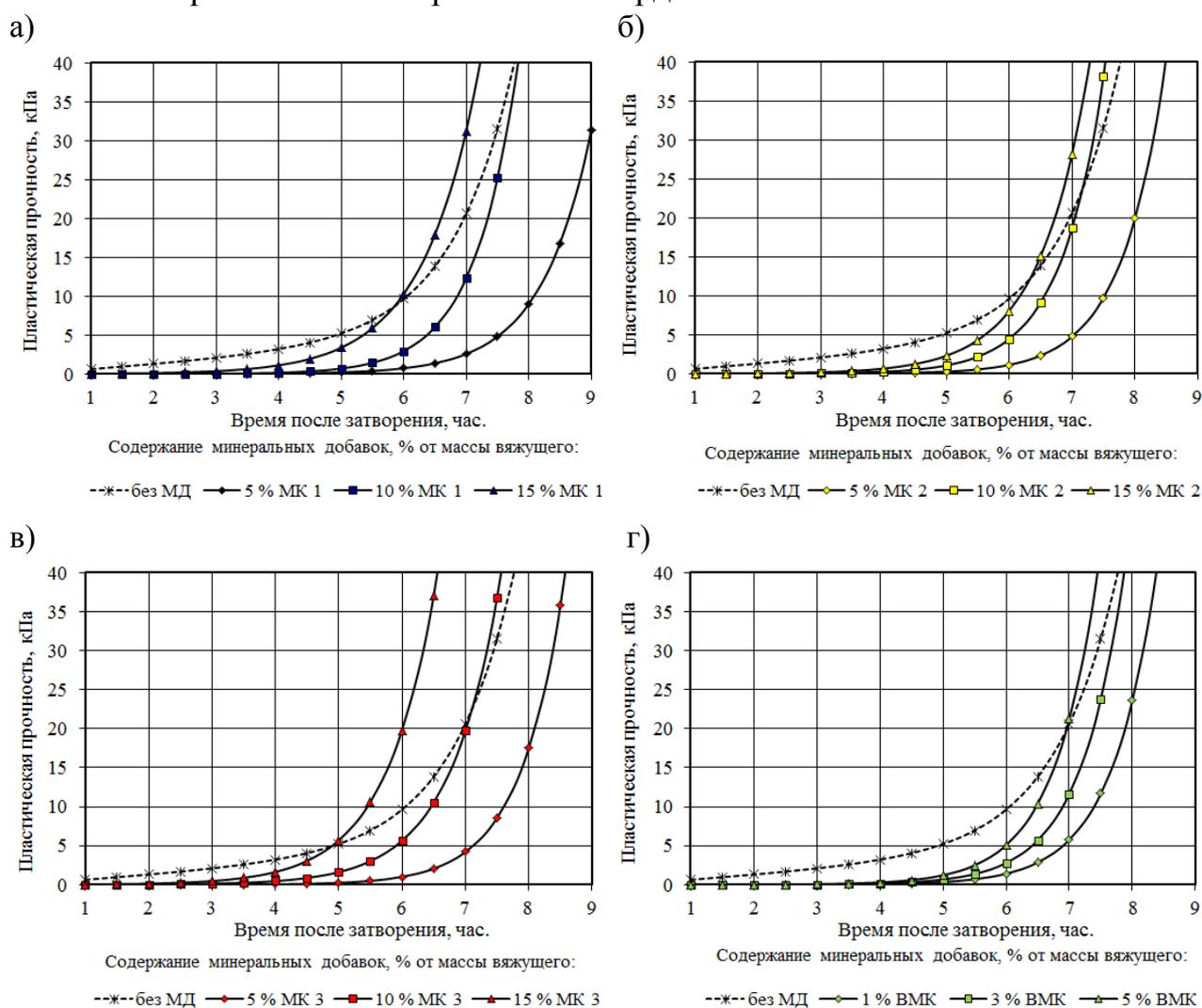


Рис. 4. Кривые пластической прочности цементных композитов с минеральными добавками (0.8% Melflux 1641 F от массы вяжущего): а – микрокремнезем Новокузнецкий неуплотненный; б – микрокремнезем Новокузнецкий уплотненный; в – микрокремнезем Братский; г – метакеолин

Установлено (рис. 4), что минеральные добавки ускоряют структурообразование цементного камня по отношению к контрольному образцу, повышают

пластическую прочность на ранних сроках твердения, увеличивая тем самым вязкость тиксотропной системы. Использование пластификатора Melflux 1641 F обеспечивает более низкую пластическую прочность на ранних этапах твердения по сравнению с контрольными составами и более поздние сроки схватывания, позволяя продлить жизнеспособность смеси на 1÷3 ч. По результатам проведенных исследований выявлены наиболее оптимальные комплексы «Melflux 1641 F + МД», позволяющие достигать быстрого набора прочности после завершения адсорбционного действия пластификатора.

Для разработки и оптимизации составов сухих строительных смесей с полифункциональными добавками с учетом оценки эффективности режимов механоактивации использовался план Хартли типа H_{a5} с 27 опытами. В ходе эксперимента (с учетом повторов) было реализовано 45 опытов для выявления отдельного воздействия микрокремнезема (МК) конденсированного уплотненного Новокузнецкого (x_1) и метакаолина (x_2). В качестве варьируемых факторов также использовались: содержание песка (x_3), суперпластификатора Melflux 1641 F (x_4), наномодификатора (x_5) и режим помола (x_6). В качестве наномодифицирующей добавки, повышающей эффективность пластификатора Melflux 1641 F, использовались водорастворимые аддукты нанокластеров углерода (АНКУ, товарный знак «Астрален® С»), разработанные и выпускаемые ЗАО «НТЦ Прикладных Нанотехнологий» (г. Санкт-Петербург).

Скоростная обработка смесей производилась в шаровой барабанной мельнице; применялись следующие режимы активации:

- режим 0 – без механоактивации;
- режим 1 – (цемент + MF 1641)(15 мин.) + МК/ВМК (15 мин.) + песок (15 мин.);
- режим 2 – (цемент + MF 1641 + МК/ВМК)(15 мин.) + песок (15 мин.).

Выбор длительности механоактивации осуществлялся на основе анализа изменения зернового и гранулометрического составов песка в процессе помола в течение 90 минут (табл. 1). Установлено, что наибольшие изменения гранулометрического состава песка происходят в течение первых 15÷30 минут помола. При увеличении длительности помола более 30 минут эффективность измельчения снижается; дальнейший прирост удельной поверхности сопровождается повышенным расходом энергии и становится экономически невыгодным.

После обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены коэффициенты полиномиальных уравнений:

- для микрокремнезема конденсированного уплотненного

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_6 \cdot x_6 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{15} \cdot x_1 \cdot x_5 + b_{16} \cdot x_1 \cdot x_6 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{36} \cdot x_3 \cdot x_6 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5 + b_{46} \cdot x_4 \cdot x_6 + b_{56} \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2 + b_{66} \cdot x_6^2 + b_{1345} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 + b_{1346} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 + b_{1356} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{1456} \cdot x_1 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{3456} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{13456} \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \quad (1)$$

- для высокоактивного метакаолина

$$y = b_0 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_6 \cdot x_6 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{25} \cdot x_2 \cdot x_5 + b_{26} \cdot x_2 \cdot x_6 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{36} \cdot x_3 \cdot x_6 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5 + b_{46} \cdot x_4 \cdot x_6 + b_{56} \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2 + b_{66} \cdot x_6^2 + b_{2345} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 + b_{2346} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_6 + b_{2356} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{2456} \cdot x_2 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{3456} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 + b_{23456} \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \quad (2)$$

Изменение зернового состава песка в процессе помола

Длительность помола, мин.	Частные остатки на ситах, % по массе					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
0	0,578	1,206	7,661	37,227	46,094	7,234
15	0,133	0,400	3,402	30,887	50,300	14,877
30	0,069	0,206	1,652	24,914	53,200	19,959
45	-	0,070	0,844	20,056	53,272	25,757
60	-	-	0,431	15,948	53,233	30,388
75	-	-	0,221	12,059	51,691	36,029
90	-	-	-	9,570	49,510	40,919

На основе разработанных экспериментально-статистических моделей проведен анализ по оценке влияния варьируемых смесевых факторов и режимов механоактивации на изменение объемов допустимых решений по водопотребности составов и пределу прочности при сжатии ССС в возрасте 3, 7 и 28 суток твердения (рис. 5). Установлено, что в возрасте 3-х суток около 90% возможных композитов с метаксаолином имеют прочность не менее 22 МПа, а с микрокремнеземом Новокузнецким уплотненным – 10 МПа; в возрасте 7 суток, соответственно, 25 и 20 МПа; в возрасте 28 суток – 35 и 22 МПа.

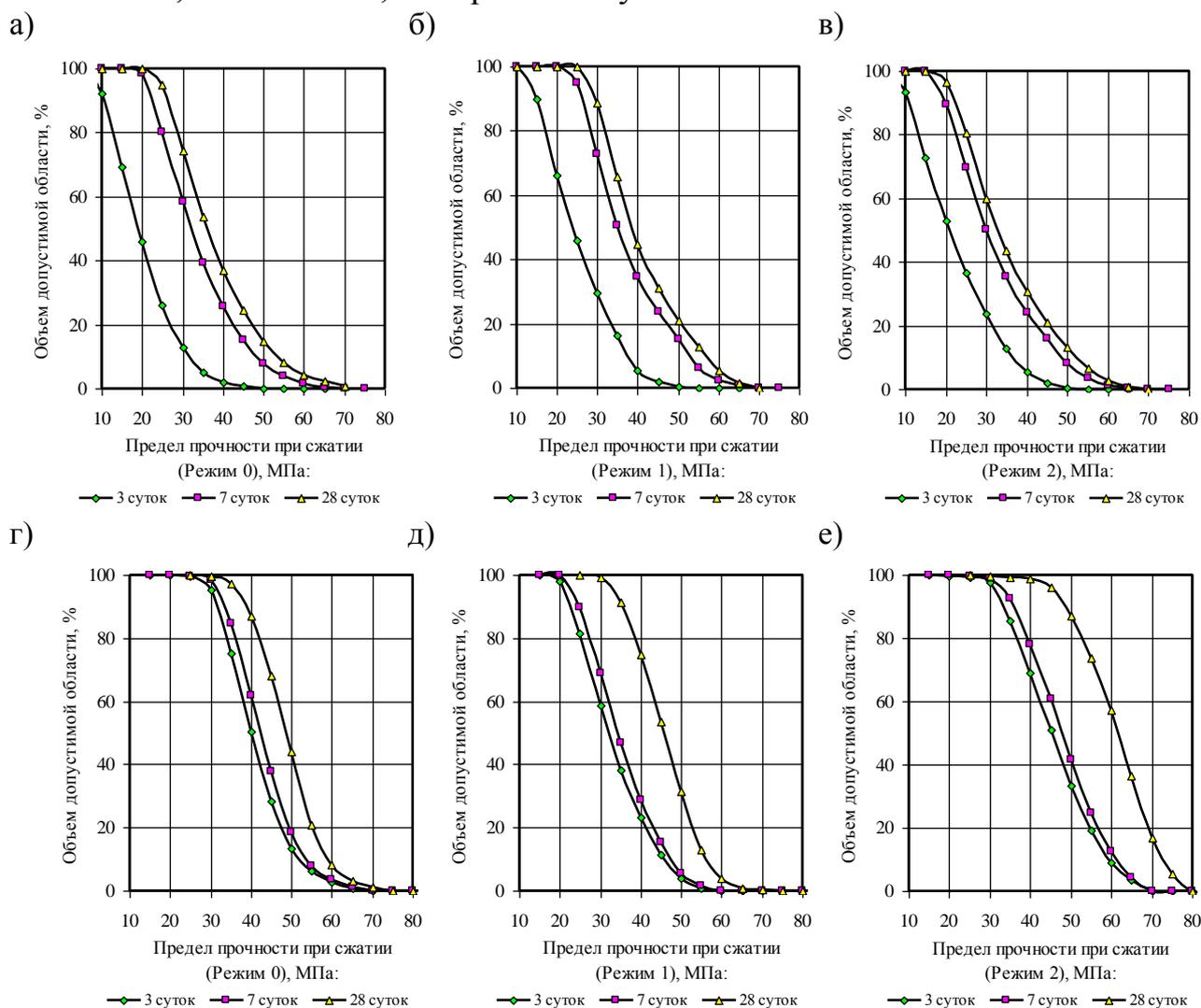


Рис. 5. Объем допустимой области предела прочности цементных композитов при сжатии: а, б, в – составы с МК; г, д, е – составы с ВМК; а, г – режим 0; б, д – режим 1; в, е – режим 2

Изучены процессы структурообразования модифицированных полифункциональными добавками цементных вяжущих. Рентгенографические исследования проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6 в медном фильтрованном излучении. Регистрируемый интервал брэгговских углов 2Θ составлял от 10 до 100° с шагом сканирования 0.01° и временем набора импульсов 1 с. Анализ фазового состава проводили на программном комплексе PDWin 4.0 с использованием базы порошковых дифракционных данных PDF-2.

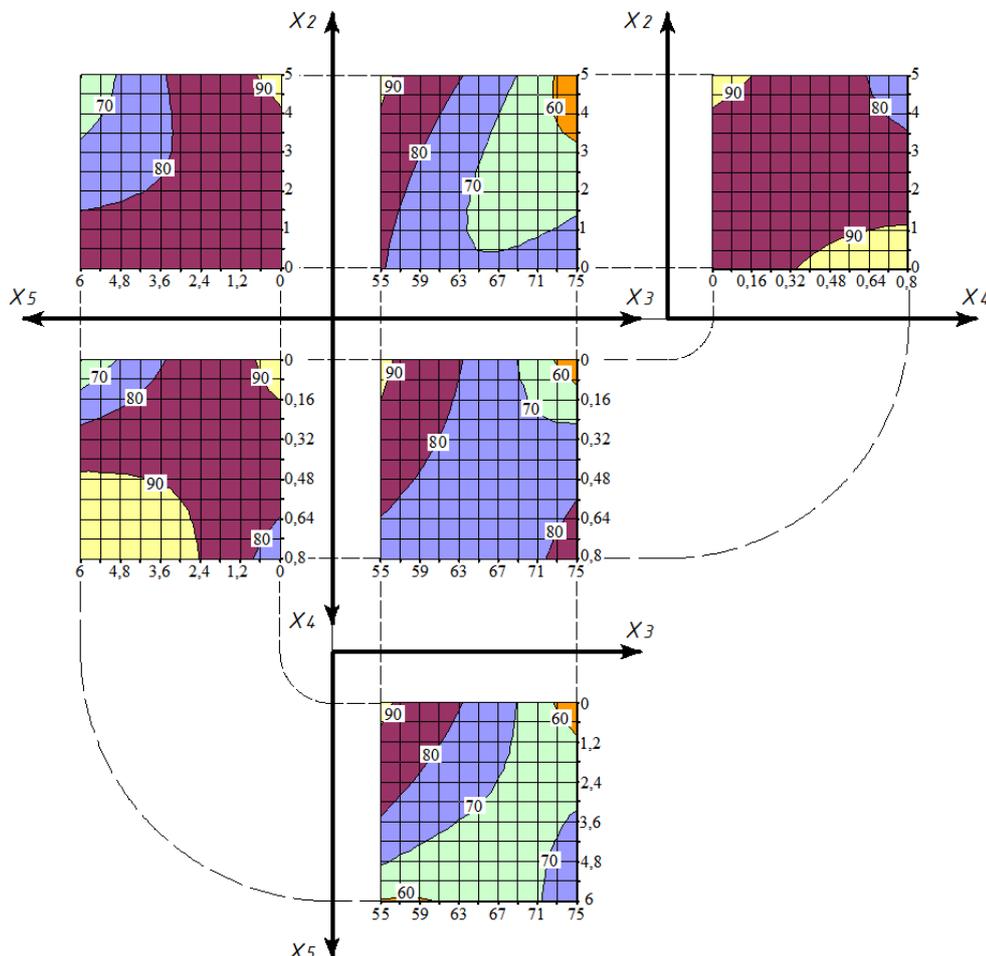
Анализ результатов для контрольного и модифицированных цементных композитов указывает на многофазность полученной системы. Для всех исследуемых композитов имеются дифракционные максимумы от кварца ($d_{\text{HKL}}=4.26, 3.35, 2.28 \text{ \AA}$) и негидратированных минералов портландцементного клинкера: C_3S – алита ($d_{\text{HKL}}=3.04; 2.77; 2.74; 2.45; 2.09; 1.93 \text{ \AA}$) и C_2S – белита ($d_{\text{HKL}}=3.35; 3.04; 2.77, 2.74; 2.49; 2.46; 2.28; 2.09 \text{ \AA}$). Кроме того, выявлены дифракционные максимумы, указывающие на присутствие кальцита ($d_{\text{HKL}}=3.86, 3.04, 2.49, 2.28, 2.09 \text{ \AA}$) и гидратных новообразований $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d_{\text{HKL}}=2.648; 1.927 \text{ \AA}$). Для цементных композитов с максимальным содержанием минеральных добавок (5% метакаолина и 15% микрокремнезема Новокузнецкого гранулированного) в отсутствие пластификатора выделяется дифракционный максимум при брэгговском угле $2\Theta=27^\circ$ ($d_{\text{HKL}}=3.29 \text{ \AA}$), предположительно, соответствующий C-S-H (I) ($d_{\text{HKL}}=3.61; 3.29; 2.81 \text{ \AA}$).

Из анализа полигонов распределения уровней факторов модифицированных цементных растворов выявлено влияние режимов механоактивации, доли песка, минеральных и пластифицирующих добавок на прочностные показатели цементных композитов на основе ССС. Показана эффективность использования номограммного метода графического анализа результатов многофакторных экспериментов, позволяющего отражать на плоскости влияние трех и более исследуемых факторов. Разработан алгоритм построения номограмм для оценки влияния 4 варьируемых смесевых факторов (содержание МК (или ВМК), песка, пластификатора Melflux 1641 F и наномодификатора АНКУ) при фиксации режима механоактивации (рис. 6). Установлены оптимальные режимы механоактивации составов ССС с полифункциональными модификаторами на основе минеральных и пластифицирующих добавок. Наибольшие прочностные показатели для цементных композитов, содержащих ВМК, достигнуты при 2-ом режиме; для составов с микрокремнеземом – при 1-ом режиме помола.

Исследования физико-механических и эксплуатационных характеристик цементных композитов на основе ССС с комплексными добавками были проведены на составах, приведенных в таблице 2. Для данных составов была изучена кинетика набора пластической прочности в зависимости от режима механоактивации, вида и содержания модифицирующих добавок (рис. 7, 8). Экспериментально подтверждена возможность регулирования времени начала активного набора прочности, исходя из предъявляемых требований, в достаточно широком временном интервале – от $1,5$ до $3,5$ часов.

В работах О.Я. Берга, Н.И. Карпенко, В.П. Селяева и других ученых доказано, что разрушение композиционных материалов представляет собой процесс множественного зарождения, развития и агрегации различного рода дефектов и микротрещин вплоть до появления макротрещин. Процесс силового разруше-

ния бетона зарождается на микроуровне как дискретный акт продвижения первичной микротрещины до точки бифуркации, которая является дефектом структуры в виде зерна наполнителя или поры. Процесс разрушения образца складывается из дискретных актов разрушения на микромасштабном уровне. При этом разрушение имеет вероятностную природу, а сам процесс накопления повреждения самоподобен, что позволяет использовать аппарат теории фракталов.



x_2 – расход ВМК, % от массы вяжущего; x_3 – содержание песка, % от массы ТФ;
 x_4 – содержание MF 1641, % от массы вяжущего; x_5 – содержание АНКУ, % от массы MF 1641

Рис. 6. Номограмма изменения доли ранней прочности (3/28 суток) цементных композитов при сжатии, % (режим помола 2)

Таблица 2

Составы сухих строительных смесей с полифункциональными модификаторами

№ состава	Масса компонентов растворной смеси, мас. час.						Режим помола
	цемент	МК	ВМК	песок	MF 1641	АНКУ	
1	23,75	0	1,25	75	0,0175	0,00105	2
2	42,75	0	2,25	55	0	0	2
3	23,75	0	1,25	75	0	0	0
4	42,75	0	2,25	55	0,126	0,00756	2
5 (контрольный)	45	0	0	55	0,0158	0	2
6	38,25	6,75	0	55	0	0	2
7	38,25	6,75	0	55	0,126	0	0
8	42,19	0	2,81	55	0	0	2
9	40,5	0	4,5	55	0	0	2

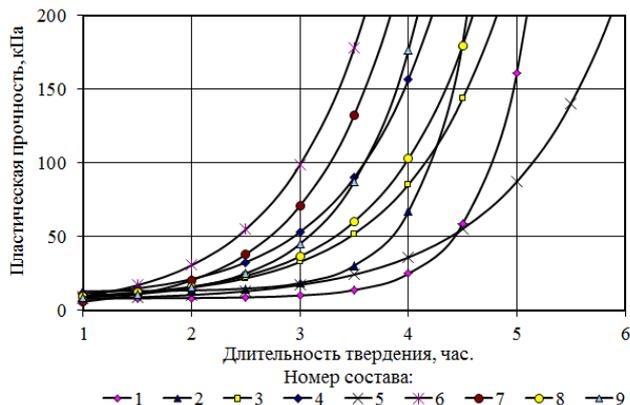


Рис. 7. Кривые пластической прочности составов сухих строительных смесей с комплексными модификаторами

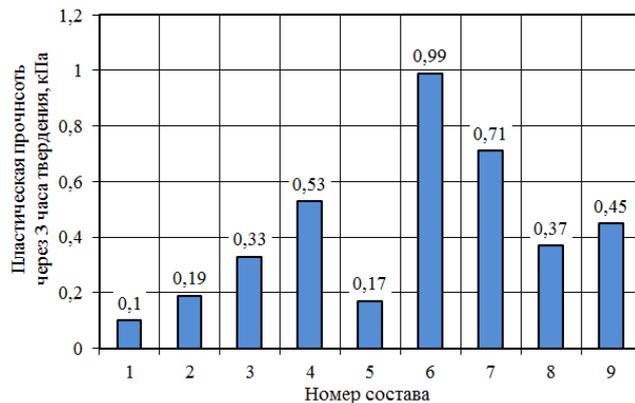


Рис. 8. Пластическая прочность растворяемых смесей через 3 часа от момента начала твердения

Программное обеспечение современного испытательного оборудования (в работе использовалась установка WilleGeotechnik®, дополнительно оборудованная климатической камерой с возможностью регулирования температуры и влажности) представляет собой высокоточную систему сбора и регистрации результатов с возможностью получения обширного объема данных. В зависимости от режима испытания скорость нагружения при использовании современных комплексов может быть задана в виде постоянной величины, характеризующей скорость нарастания напряжений или деформаций во времени, причем фиксирование показаний может происходить с интервалом не только в доли минуты, но и доли секунды. Учитывая, что прирост напряжений и деформаций в образце при проведении испытаний на сжатие развивается во времени с определенным (заданным) шагом, появляется возможность для его описания применить фрактальный анализ временных рядов. В работе применяли режим испытаний, фиксирующий прирост деформаций с постоянным шагом (см. рис. 9 – шаг 0,01 сек.).

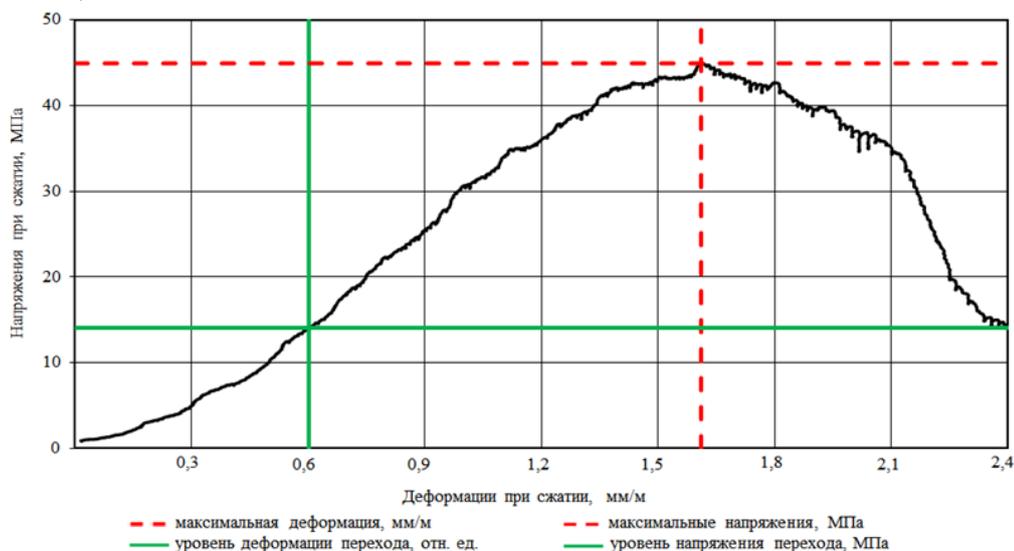


Рис. 9. Кривая деформирования составов цементных композитов при сжатии (шаг фиксации показаний – 0,01 сек.)

В ходе теоретических и экспериментальных исследований рассмотрены способы оценки фрактальной структуры временных рядов; предложена методика для количественной оценки фрактальной размерности кривых деформирования на основе индекса длины, позволяющая дать интегральный способ описания процесса разрушения композиционных строительных материалов. Для определения «критических» точек на кривой деформирования предложена методика, основанная на оценке изменения индекса фрактальности μ в процессе нагружения образцов сжимающей нагрузкой, определяемого с помощью метода минимального покрытия. Показано, что алгоритм вычисления фрактальной размерности кривых деформирования, определяемой с помощью метода наименьшего покрытия, предложенного Н.В. Старченко, имеет более быстрый выход на степенной асимптотический режим по сравнению с традиционными методами Херста и покрытия квадратами.

Анализ кривых изменения индекса фрактальности μ позволяет оценить тип поведения исследуемого композита в каждой точке кривой нагружения (рис. 10). Если $\mu > 0,5$ то наблюдается период относительного спокойствия «флэт»; если $\mu < 0,5$, то – период относительно длительного движения вверх или вниз «тренд». Проведен анализ окрестностей точки перехода исследуемого цементного композита из состояния относительного покоя в состояние выраженного тренда на основе графических зависимостей в виде «японской свечи». Установлено, что точке перехода образца из относительно спокойного состояния в «критическое» предшествует этап снижения прироста напряжений, что свидетельствует о возникновении определенных «трудностей» при перераспределении напряжений с дефектных участков на «хорошие» и связано с началом формирования микротрещин и дефектов, приводящих впоследствии к образованию магистральной трещины и разрушению образца.

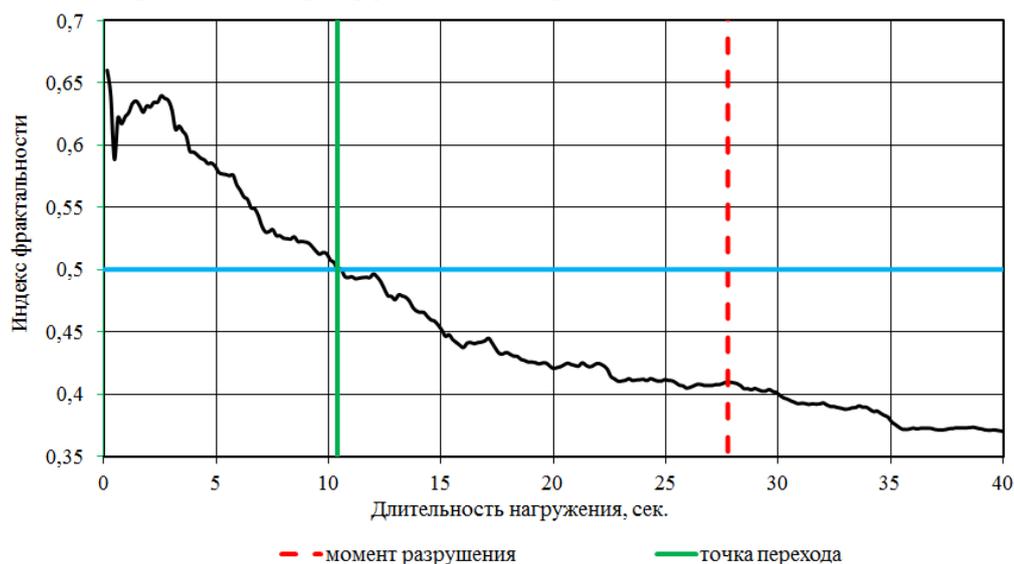


Рис. 10. Изменение индекса фрактальности прироста напряжений в зависимости от длительности нагружения (вертикальная штриховая линия – время разрушения образца; вертикальная сплошная линия – точка перехода состояния образца из состояния «флэт» в состояние «тренд»; горизонтальная линия соответствует индексу фрактальности $\mu = 0,5$)

На основе фрактального анализа временных рядов предложен подход, позволяющий определять положение точек бифуркации на кривой деформирования, что позволяет получить ценную информацию о разрушении композитов под действием механической нагрузки. Выявлено, что число подобных «критических» точек и их расположение на кривой деформирования зависит от прочностных показателей материала, а также наличия в его структуре дефектов, развитие которых в процессе нагружения оказывает существенное влияние на прочностные показатели элемента конструкции в целом.

На основе метода наименьшего покрытия проведен фрактальный анализ кривых деформирования цементных композитов на основе ССС при сжатии. Определены значения индексов фрактальности (μ^σ и μ^ε) и фрактальных размерностей (D_μ^σ и D_μ^ε) кривых деформирования разработанных составов при сжатии (табл. 3). Учитывая, что разрушение образца при сжатии может произойти как из-за потери несущей способности, так и из-за превышения предельных деформаций, введен коэффициент K_D , определяемый как отношение фрактальных размерностей кривых деформирования образцов при сжатии:

$$K_D = D_\mu^\sigma / D_\mu^\varepsilon. \quad (3)$$

Установлены корреляционные зависимости K_D с пределом прочности при сжатии. Выявлено, что повышение величины коэффициента K_D свидетельствует о снижении предела прочности цементных композитов при сжатии (рис. 11).

Таблица 3

Значения фрактальных размерностей кривых деформирования цементных композитов на основе ССС с полифункциональными добавками

Номер состава	Значения фрактальных размерностей кривых деформирования в зависимости от длительности твердения					
	D_μ^σ			D_μ^ε		
	3 суток	7 суток	28 суток	3 суток	7 суток	28 суток
1	1,577	1,550	1,559	1,474	1,328	1,508
2	1,488	1,507	1,546	1,443	1,455	1,504
3	1,455	1,524	1,553	1,369	1,441	1,513
4	1,478	1,550	1,422	1,480	1,555	1,498
5	1,478	1,651	1,474	1,480	1,526	1,516
6	1,506	1,500	1,554	1,364	1,463	1,556
7	1,507	1,497	1,499	1,497	1,416	1,454
8	1,518	1,551	1,482	1,489	1,447	1,592
9	1,483	1,586	1,465	1,488	1,516	1,539

Из анализа изменения индекса фрактальности в процессе нагружения образца сжимающей нагрузкой определены положения «критических» точек кривых деформирования, характеризующих: зарождение в структуре первых микротрещин (рис. 12, а); начало процесса интенсивного образования микро- и макродефектов (рис. 12, б); момент формирования макротрещин, приводящих к лавинообразному разрушению образца (рис. 12, в).

Установлены закономерности изменения технологических и эксплуатационных характеристик разработанных цементных композитов на основе ССС с полифункциональными добавками. Для повышения адгезионной прочности

разрабатываемых составов (при использовании их в качестве штукатурных или кладочных) были использованы добавки на основе производных целлюлозы (Culminal C 1902 Plus, Culminal C 8062, Culminal C 8564, Combizell APR 200), вводимые в количестве 0,2% от массы вяжущего; экспериментально установлено повышение адгезии на 32 ÷ 45%. Наибольшая эффективность повышения адгезионной прочности, составляющая 39 ÷ 47% по отношению к составам без добавки, зафиксирована при использовании редиспергируемого полимерного порошка Rhoimat PA 050, вводимого в количестве 1% от массы вяжущего.

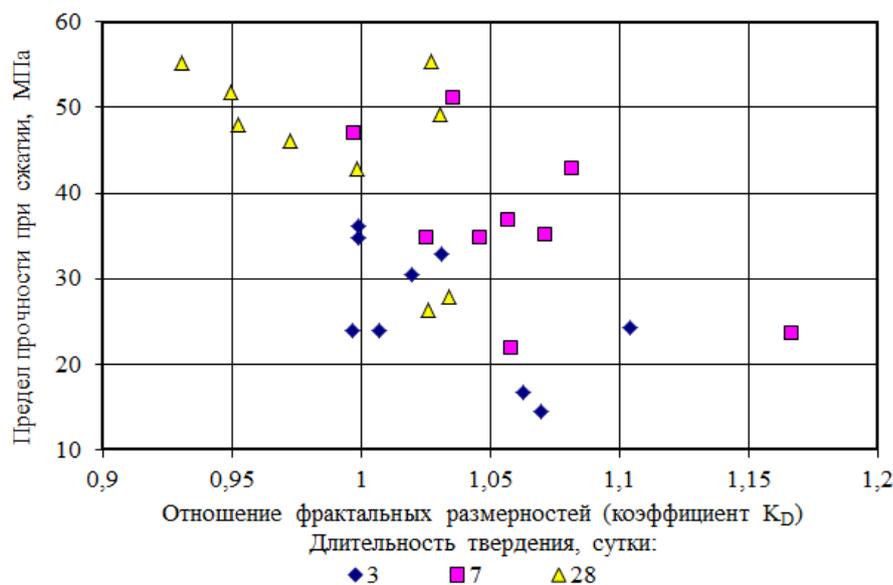


Рис. 11. Корреляционная зависимость между пределом прочности при сжатии цементных композитов на основе ССС с полифункциональными добавками и коэффициентом K_D

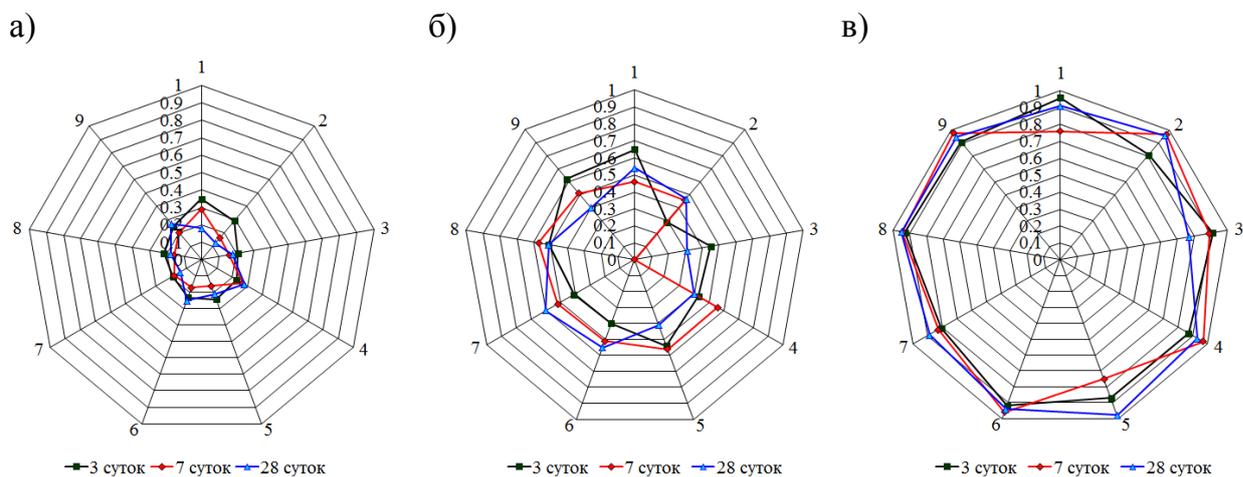


Рис. 12. Уровни напряжений цементных композитов при сжатии (в относительных единицах от разрушающей нагрузки), при которых в структуре составов ССС с полифункциональными добавками начинается: а – формирование первых микротрещин; б – интенсивное формирование микро- и макродефектов; в – формирование макротрещин, приводящих к разрушению композита

Основные физико-механические характеристики цементных композитов на основе сухих строительных смесей с комплексными модификаторами приведены в таблице 4. В качестве прототипа был выбран цементный раствор

Weber.vetonit S 30, используемый для заливки тонкой (10–50 мм) бетонной стяжки пола и тротуарных плит, штукатурных работ, заделки швов между бетонными элементами, устранения дефектов заливки бетонных конструкций и т.д. Из результатов проведенных исследований следует (табл. 4), что разработанные цементные композиты на основе ССС с комплексными модификаторами обладают высокой прочностью (предел прочности при сжатии 44,3÷56,9 МПа), морозостойкостью (F75÷F300), адгезионными характеристиками (адгезионная прочность 0,69÷1,04 МПа) и требуемой подвижностью (П_{к2} ÷ П_{к3}) для получения долговечных растворов общестроительного назначения.

Таблица 4

Физико-механические характеристики цементных композитов на основе сухих строительных смесей с комплексными модификаторами

Параметр	№ состава									Прототип (Weber.vetonit S30)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Плотность смеси, кг/м ³	2138	2173	2083	2182	2143	2038	2075	2142	2154	2050
Предел прочности при изгибе, МПа	4,8	7,1	4,1	7,7	5,6	4,8	4,0	4,2	6,7	не нормируется
Предел прочности при сжатии, МПа	26,0	54,7	26,8	51,8	44,3	35,4	50,9	56,9	46,1	33,0
Адгезионная прочность, МПа	0,84	0,71	0,69	0,92	1,04	0,72	0,97	0,99	0,89	не нормируется
Водоудерживающая способность, %	99,1	98,9	98,3	98,9	98,2	98,5	98,9	98,5	98,6	не нормируется
Водопоглощение по массе, %	8,6	6,5	8,2	6,8	9,1	5,8	6,2	8,4	8,2	не нормируется
Водопоглощение по объему, %	14,6	11,0	14,3	11,6	15,2	10,4	10,9	14,4	14,1	не нормируется
Марка по морозостойкости	F300	F75	F300	F300	F75	F150	F100	F300	F300	F100
Марка по подвижности	П _{к3}	П _{к2}	П _{к2}	П _{к2}	П _{к3}	П _{к2}	П _{к3}	П _{к2}	П _{к3}	не нормируется

Разработана технологическая схема производства составов ССС с полифункциональными модификаторами на основе минеральных и пластифицирующих добавок. В приложении приведен проект стандарта организации «Смеси сухие строительные. Технические условия».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработаны составы сухих строительных смесей с полифункциональными модификаторами на основе минеральных и пластифицирующих добавок. Цементные композиты на основе ССС с комплексными модификаторами обладают комплексом следующих эксплуатационных и технологических характеристик: предел прочности при сжатии 44,3÷56,9 МПа; водоудерживающая спо-

способность 98÷99 %; адгезионная прочность 0,69÷1,04 МПа; водопоглощение по массе 5,8÷9,1 %; объем открытых капиллярных пор 10,9÷15,2 %; марка по подвижности $P_{к2} \div P_{к3}$; морозостойкость – F75÷F300.

2. Установлены закономерности комплексного влияния пластифицирующей (суперпластификатор Melflux 1641 F) и минеральных добавок 4 видов (микрокремнеземы конденсированные неуплотненный и уплотненный Новокузнецкие МК-85 и МКУ-85, микрокремнезем неуплотненный Братский МК-85 и метакаолин) на водопотребность и загущающую способность цементных вяжущих. Экспериментально подтверждено, что наиболее рациональным способом повышения эффективности модификаторов цементных композитов на основе минеральных добавок является их использование в виде полифункциональных добавок совместно с суперпластификаторами.

3. Установлено влияние комплексных модификаторов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатного пластификатора на изменение поровой структуры цементного камня. Выявлено, что формирование наибольшего объема открытых капиллярных пор и, как следствие, резкое повышение водопоглощения наблюдается при использовании Братского микрокремнезема. Наименьшее влияние на процесс порообразования оказывает введение метакаолина и микрокремнезема Новокузнецкого неуплотненного.

4. Разработаны составы вяжущих на основе цемента марки ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовский цементный завод» и минеральных добавок (микрокремнезем, метакаолин) с учетом снижения расхода дорогого импортного пластификатора Melflux1641 F при обеспечении необходимого уровня технологических и эксплуатационных характеристик цементных композитов. Оптимальные составы по прочностным показателям получены при введении: от 6 до 15 % микрокремнезема Новокузнецкого неуплотненного и содержании пластификатора 0.4÷0.6 %; метакаолина – от 2 до 4.5% и Melflux 1641 F – 0.2÷0.6% от массы вяжущего. При использовании в качестве минеральной добавки метакаолина предел прочности при сжатии в зоне оптимума превышает 90 МПа

5. Установлены оптимальные режимы механоактивации составов ССС с полифункциональными модификаторами на основе минеральных и пластифицирующих добавок. Наибольшие прочностные показатели для составов, содержащих ВМК, достигнуты при 2-ом режиме; для составов с микрокремнеземом – при 1-ом режиме помола.

6. Изучена кинетика набора пластической прочности цементных композитов на основе ССС в зависимости от режима механоактивации, вида и содержания модифицирующих добавок. Экспериментально подтверждена возможность регулирования времени начала активного набора прочности, исходя из предъявляемых требований, в достаточно широком временном интервале – от 1,5 до 3,5 часов.

7. Разработаны экспериментально-статистические модели изменения упруго-прочностных характеристик цементных композитов и проведен их анализ по оценке влияния варьируемых факторов и режимов механоактивации на изменение объемов допустимых решений по водопотребности и пределу прочности при сжатии цементных композитов на основе модифицированных составов ССС в возрасте 3, 7 и 28 суток твердения. Установлено, что в возрасте 3-х суток

около 90 % возможных составов с метакаолином имеют прочность не менее 22 МПа, а с микрокремнеземом Новокузнецким уплотненным – 10 МПа; в возрасте 7 суток, соответственно, 25 и 20 МПа; в возрасте 28 суток – 35 и 22 МПа. На основе анализа полигонов распределения уровней факторов модифицированных цементных растворов выявлено влияние режимов механоактивации, доли песка, минеральных и пластифицирующих добавок на прочностные показатели цементных композитов на основе модифицированных составов ССС.

8. Предложена методика определения индекса фрактальности в качестве локального показателя кривых деформирования при сжатии, основанная на методе минимального покрытия. На основе фрактального анализа предложен подход, позволяющий определять положение точек бифуркации на кривой деформирования цементных композитов, что позволяет получить ценную информацию о разрушении композитов под действием механической нагрузки. Определены значения индексов фрактальности и фрактальных размерностей разработанных ССС с полифункциональными добавками. Введен коэффициент K_D , отражающий отношение фрактальных размерностей, полученных из анализа временных зависимостей прироста напряжений и относительных деформаций; установлены корреляционные зависимости K_D с пределом прочности при сжатии. Из анализа изменения индекса фрактальности в процессе нагружения образца сжимающей нагрузкой определены положения «критических» точек кривых деформирования, характеризующих: зарождение в структуре первых микротрещин; начало процесса интенсивного образования микро- и макродефектов; момент формирования макротрещин, приводящих к лавинообразному разрушению образца.

9. Разработана технологическая схема производства сухих строительных смесей с полифункциональными добавками.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Разработанные составы сухих строительных смесей с полифункциональными модификаторами на основе минеральных и пластифицирующих добавок, могут быть использованы на существующих и вновь создаваемых предприятиях по производству ССС различного назначения. Разработанные экспериментально-статистические модели и алгоритмы оптимизации составов ССС могут быть использованы при проведении дальнейших исследований цементных композитов на основе цементных вяжущих с комплексными добавками.

Разработанную методику определения «критических» точек кривых деформирования при сжатии на основе фрактальных методов анализа необходимо апробировать на широком классе строительных композитов, а так же изучить характер изменения уровней контролируемых напряжений и деформаций в зависимости от интенсивности и длительности агрессивных воздействий, в том числе и в условиях природных климатических факторов.

Результаты диссертационного исследования расширяют методологические основы строительного материаловедения и могут быть использованы в учебном процессе.

Основные результаты исследований опубликованы в следующих работах:

Публикации в изданиях, рекомендуемых Перечнем ВАК:

1. Низина, Т.А. Влияние минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики цементных композитов [Текст] / Т.А. Низина, А.В. Балбалин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – №2. – С. 148-153.

2. Низина, Т.А. Механическая активация цементных смесей с полифункциональными добавками [Текст] / Т.А. Низина, А.В. Балбалин // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – №2. – С. 36-42.

3. Селяев, В.П. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов [Текст] / В.П. Селяев, Т.А. Низина, А.В. Балбалин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. Ч. 2, Вып. 31 (50), Волгоград. – 2013. – С. 156-163.

Публикации в других изданиях:

4. Низина, Т.А. Анализ водопотребности модифицированных цементных композитов с минеральными добавками [Текст] / Т.А. Низина, А.В. Балбалин, А.А. Вагапов, А.В. Тишин // Сборник материалов XII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии». Тула. – 2011. – С. 46-47.

5. Низина, Т.А. О формировании ранней прочности модифицированных цементных композитов с минеральными добавками [Текст] / Т. А. Низина, А. В. Балбалин // «Строительство, архитектура, дизайн» – № 2(11), 2011. (<http://marhdi.mrsu.ru> идентификационный номер 0421000075\0060).

6. Балбалин, А.В. Влияние минеральных добавок на водопоглощение и капиллярную пористость цементных композитов [Текст] / А.В. Балбалин, Т.А. Низина, Н.М. Кузнецов // Актуальные вопросы строительства: материалы Международ. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2011. – С. 124-128.

7. Низина, Т.А. Анализ кинетики твердения цементных вяжущих, модифицированных поликарбоксилатными пластификаторами и активными минеральными добавками [Текст] / Т.А. Низина, А.В. Балбалин // Проблемы современного бетона и железобетона : материалы III международного симпозиума (Минск, 9-11 ноября 2011 г.) : в 2 т. – Т. 2: Технология бетона, 2011. – С. 398-405.

8. Балбалин, А.В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок [Текст] / А.В. Балбалин, Т.А. Низина // Сборник научных трудов по материалам II Всероссийской научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона». Саратов, 2012. – С.65-69.

9. Балбалин, А.В. Оптимизация составов цементных вяжущих с полифункциональными модификаторами для сухих строительных смесей [Текст] / А.В. Балбалин, Т.А. Низина // Материалы Международной научно-практической конференции «Строительство-2012». – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2012. – С. 7-8.

10. Балбалин, А.В. Анализ влияния минеральных добавок на свойства цементных композитов [Текст] / А.В. Балбалин, Т.А. Низина // Сборник материа-

лов XIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии». Тула, 2012. – С. 6.

11. Балбалин, А.В. Кинетика твердения цементных вяжущих, модифицированных поликарбоксилатными пластификаторами и активными минеральными добавками [Текст] / А.В. Балбалин, Т.А. Низина, А.С. Балыков // Актуальные вопросы строительства: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 112-116.

12. Балбалин, А.В. Эффективность применения механической активации поликомпонентных цементных смесей [Текст] / А.В. Балбалин // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: материалы VIII Международной конференции молодых учёных / под общ. ред. М.О. Коровкина – Пенза: ПГУАС, 2013. – С. 15-19.

13. Балбалин, А.В. Влияние механической активации на свойства поликомпонентных цементных смесей [Текст] / А.В. Балбалин, Т.А. Низина // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона». Саратов, 2013. – С. 14-18.

14. Балбалин, А.В. Влияние полифункциональных добавок на пластическую прочность ССС с повышенными эксплуатационными характеристиками [Текст] / А.В. Балбалин // Разработка эффективных авиационных, промышленных, электротехнических и строительных материалов и исследование их долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 97-101.

15. Балбалин, А.В. Исследование влияния температурно-влажностного режима на упруго-прочностные характеристики мелкозернистых бетонов [Текст] / А.В. Балбалин, Д.Р. Низин, Т.А. Низина, А.С. Балыков // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: материалы IX Международной конференции молодых учёных / под общ. ред. В.И. Калашникова – Пенза: ПГУАС, 2014. – С. 8-12.

16. Балбалин, А.В. Влияние минеральных добавок на нормальную плотность наполненных цементных систем [Текст] / А.В. Балбалин, Т.А. Низина, Н.М. Кузнецов // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Ресурсо- и энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона». Саратов, 2014. – С.24-27.

17. Низина, Т.А. Фрактальный анализ кривых деформирования композиционных строительных материалов при сжатии / Т.А. Низина, А.В. Балбалин, А.С. Балыков / Огарёв-online. Раздел «Технические науки». 2015. – Выпуск 13. – режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/arts/fraktalnyj-analiz-krivykh-deformirovaniya-kompozicionnykh-stroitelnykh-materialov-pri-szhatii>.

Балбалин Алексей Владимирович

ЦЕМЕНТНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ
СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ МОДИФИКАТОРОВ

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 07.07.15. Объем 1,50 п. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 734.
Типография Издательства Мордовского университета
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24