

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства»

В.И. Калашников, Е.Ю. Миненко, Ю.В. Грачева

**ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ
ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

Пенза 2013

УДК 666.972-16:620.192.52

ББК 38.38.В7

К74

Рецензент – декан архитектурно-строительного факультета ГОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», заведующий кафедрой строительных материалов и технологий, доктор технических наук, профессор В.Т. Ерофеев

Калашников В.И.

К74

Применение новых эффективных материалов для дорожного строительства: моногр. / В.И. Калашников, Е.Ю. Миненко, Ю.В. Грачева. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 137 с.
ISBN 978-5-9282-0901-8

Обоснована возможность эффективного использования ультрадисперсных минеральных наполнителей на основе техногенных отходов с целью снижения усадки и повышения усадочной трещиностойкости фибробетонов.

Книга предназначена для аспирантов, магистрантов и студентов, обучающихся по направлению 190700 «Технология транспортных процессов», а также научных и инженерно-технических работников, занимающихся изучением и разработкой строительных материалов для дорожного строительства.

ISBN 978-5-9282-0901-8

© Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2013

© Калашников В.И., Миненко Е.Ю.,
Грачева Ю.В., 2013

О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1. СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВАХ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ	7
1.1. Зарубежный и отечественный опыт применения фибробетона	7
1.2. Многокомпонентность бетона как фактор получения бетонов различного функционального назначения	11
1.3. Усадка и усадочная трещиностойкость цементного камня и бетона как фактор долговечности конструкционного материала. Классификация усадки	16
1.4. Основные закономерности развития усадочных деформаций в зависимости от рецептурно-технологических факторов	24
1.5. Влияние эффективных суперпластификаторов, наполнителей и микроармирующих добавок на усадку и усадочную трещиностойкость высокопрочного бетона	32
2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ	38
3. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ГИДРАТАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ	42
3.1. Оценка влияния ультрадисперсных минеральных наполнителей на водопотребность цементных суспензий	42
3.2. Процессы гидратации и формирование структуры цементного камня с ультрадисперсными микронаполнителями	45
4. УСАДКА И УСАДОЧНАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ	56
4.1. Влияние вида и дисперсности наполнителей на усадку и усадочную трещиностойкость модифицированного цементного камня	56
4.2. Усадка и усадочная трещиностойкость бетона с ультрадисперсными модификаторами	69
5. ВЛИЯНИЕ АРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ОБЪЕМНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА	81
5.1. Влияние вида и содержания армирующих элементов на прочность бетона	85

5.2. Усадка цементного камня, модифицированного полиамидным волокном.....	89
5.3. Усадка высокопрочного бетона, модифицированного полиамидными волокнами.....	92
5.4. Влияние длины и содержания металлических волокон на прочность бетона	97
5.5. Ударная вязкость высокопрочного бетона, модифицированного металлическими волокнами.....	101
5.6. Усадка высокопрочного бетона, модифицированного металлическими волокнами.....	104
6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА ПРИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ.....	106
6.1. Использование метода акустической эмиссии для оценки трещиностойкости бетонных образцов	106
6.1.1. Понятие акустической эмиссии и ее основные источники.....	109
6.1.2. Акустическая эмиссия в телах с дефектами.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	126

ПРЕДИСЛОВИЕ

По объемам производства, эксплуатационно-строительным свойствам бетон и железобетон являются основными конструкционными материалами. Только в России в XX веке в строительстве было использовано около 10 миллиардов кубометров бетона и железобетона. Мировой объем производства этой продукции достигает трех миллиардов кубометров в год. Получив название «материал XX века», железобетон благодаря уникальным свойствам успешно занял свою нишу и постоянно расширяет её границы в общей структуре строительной продукции, заменив собой в большинстве случаев дорогостоящий металл [6, 10].

Современные высокопрочные и высококачественные бетоны, отвечая задачам технического прогресса, позволяют существенно снизить материалоемкость и повысить эффективность строительства. Вместе с тем сегодня предъявляется новый уровень требований к бетонам. Это объясняется применением их не только в обычных, но и в особых экстремальных условиях, в конструкциях новых архитектурных форм, оболочках, тонкостенных панелях со сложным рельефом, пустотелых балках, трубах, резервуарах, покрытиях дорог, аэродромов, защитных элементов и т.д., где необходимы повышенная трещиностойкость, прочность на растяжение, высокая ударная вязкость и износостойкость [8, 9].

В настоящее время наряду с новым строительством ведется реставрация и реконструкция старых объектов. Проблемы, связанные с повышением долговечности и водопроницаемости бетона, особенно часто возникают в подземных переходах, различного рода ограждающих конструкциях, дорожных покрытиях, гидротехнических сооружениях и т.д. Вода, фильтруясь через бетон, вызывает разрушение защитного слоя, обнажение арматуры и ее коррозию, что снижает срок эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций. Существующие методы понижения проницаемости бетонных конструкций и изделий, основанные на обработке их поверхностей, сопряжены с увеличением стоимости, трудоемкости и сроков строительства [9].

Дисперсное фибровое армирование бетона позволяет в значительной степени компенсировать главные недостатки – низкую прочность на растяжение и хрупкость разрушения, а также снижает усадку и ползучесть.

В качестве армирующих элементов [36] приняты включения, условно разделяемые по соотношению l/d (l – длина, d – диаметр включения) на:

- элементы в виде ультрадисперсных минеральных частиц, для которых $l/d = 1$;
- элементы в виде волокон – $l/d \gg 1$.

Армирующим элементом на макромасштабном уровне являются волокна, а на микромасштабном уровне (уровне цементного камня) – вводимые совместно с цементом высокодисперсные минеральные наполнители.

Фибробетон выгодно отличается от традиционного бетона, имея в несколько раз более высокие по сравнению с ним прочность на растяжение

и срез, ударную и усталостную прочность, трещиностойкость и вязкость разрушения, морозостойкость, водонепроницаемость, сопротивление кавитации, жаропрочность и жаростойкость. По показателю работы разрушения фибробетон может в 15-20 раз превосходить бетон. Это обеспечивает его высокую технико-экономическую эффективность при использовании в строительных конструкциях [2, 24, 69, 70, 79].

Экспериментальные и теоретические исследования физико-механических свойств фибробетонов и опыт их применения позволили выявить эффективную номенклатуру изделий, конструкций и сооружений из них; на сегодня разработана проектная документация более чем на 30 наименований [69, 75].

Анализ отечественного и зарубежного опыта применения фибробетонных конструкций и изделий показывает высокую технологическую эффективность сталефибробетона и целесообразность его использования для изготовления строительных конструкций многоцелевого назначения и широкой номенклатуры.

Применение дисперсно-армированных бетонов в строительстве создает предпосылки для значительного сокращения объемов традиционных арматурных работ, расширяет технологические возможности получения конструкций различного профиля с более высоким уровнем их трещиностойкости, сопротивлением к различным видам силовых воздействий, в том числе к динамическим [24, 69].

Использование дисперсно-армированных бетонов может обеспечить во многих случаях значительный экономический эффект: за счет уменьшения в ряде случаев сечения конструкций соответственно снижается их стоимость, а также сокращается расход бетона и стали.

Дальнейшее расширение масштабов применения в строительстве дисперсно-армированных бетонов связано во многом с необходимостью решения двух важных задач: с организацией промышленного производства фибровой арматуры и освоением технологии изготовления дисперсно-армированных бетонов и конструкций на их основе на действующих и вновь возводимых предприятиях строительной индустрии [24, 69, 75].

Наряду с этим сохраняют актуальность вопросы дальнейшего углубления теоретических представлений в области дисперсно-армированных бетонов, совершенствования технологии их изготовления, накопления практического опыта применения в различных условиях строительства и эксплуатации.

Разработанная в нашей стране технология изготовления таких бетонов и конструкций, армированных волокнами с их направленной и свободной ориентацией, в техническом отношении не уступает зарубежным. Освоение опыта и дальнейшее развитие производства дисперсно-армированных бетонов будут способствовать распространению в отечественной строительной индустрии этих эффективных материалов.

1. СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВАХ ДИСПЕРСНО- АРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

1.1. Зарубежный и отечественный опыт применения фибробетона

Первые работы, относящиеся к получению фибробетонов с применением стальных волокон, в отечественной строительной индустрии связывают с именем В.П. Некрасова, которым еще в 1907 г. был проведен комплекс работ и описаны результаты исследований по получению бетонных материалов, регулярно и хаотически дисперсно-армированных отрезками проволок малых диаметров. Имелись предложения вводить в бетонную металлическую шерсть, стружки и другие подобные материалы, однако введение в бетон волокон не всегда давало желаемые результаты [76, 90, 98].

Первое практическое применение фибробетона в ёмкостных сооружениях дало положительный результат в нашей стране в 1979 г. при установке монолитного днища прямоугольного резервуара размером 12×18 м для технической воды в Ленинграде на Северной водопроводной станции. Расход металлических фибр составлял 120 кг/м³ бетона. В месте сопряжения стен с днищем резервуара укладывались арматурные сетки, т.е. было применено первое комбинированное армирование.

На сегодняшний день в отечественной практике разработана проектная документация более чем на 30 наименований конструкций. В опытном порядке внедрены такие фибробетонные конструкции, как дорожные, тротуарные и аэродромные плиты, ребристые и складчатые плиты покрытий, кольца круглых смотровых колодцев, трубы, лотки, плиты пола и несъёмной опалубки, ограждения лоджий и балконов, свай и др.

Представляет особый интерес использование фибробетона в сборных конструкциях ёмкостных сооружений. Для резервуаров с сеткой колонн 3×6 м разработаны фибробетонные панели перегородок толщиной 40 мм, в то время как в типовых конструкциях из железобетона толщина перегородок составляет 80 мм. Перегородки крепят к колоннам стальными скобами, чтобы вдвое снизить расход бетона, на 8 % – расход стали [76, 90, 98].

Лотки из фибробетона для водопровода и канализации разработаны в двух вариантах: прямоугольные и угловые для сооружений цилиндрической формы. Прямоугольные длиной 3 м предназначены для установки по опорам, длиной 6 м – по сплошному бетонному основанию. Высота прямоугольных лотков меняется от 300 до 900 мм, ширина – от 200 до 1200 мм, толщина стенок – от 35 до 50 мм.

Важной проблемой при возведении многих строительных объектов является забивка свай до проектной отметки. Применение фибр для арми-

рования голов свай резко повышает их ударостойкость, в результате чего сокращается число недозабитых свай, повышается производительность сваебойного оборудования.

Сваи с железобетонным стволом и с фибробетонной головой впервые были использованы при строительстве цеха термической сушки в 1974 г. В 1983–1984 гг. институтами Фундаментпроект, НИИЖБ, ЛенЗНИИЭП на основании проведенных исследований были разработаны рабочие чертежи для широкой номенклатуры свай с применением фибробетона.

Представляет интерес использование фибробетона в трубах и кольцах канализационных и водопроводных сетей. Внедрение фибробетонных стеновых колец смотровых колодцев позволило снизить трудозатраты и материалоёмкость конструкций, улучшить их качество и почти полностью устранить производственный брак [39].

В НИИЖБ разработаны, испытаны и применены складчатые панели покрытий рулонной кровли для жилых и сельскохозяйственных зданий, складских помещений, навесов для пассажирских платформ, стоянок автотранспорта и др.

С использованием складчатых и тонкостенных панелей могут быть возведены различные помещения для складирования и укрытия техники. Эффективным примером является разработанная ЛенЗНИИЭП конструкция здания универсального назначения с пролётом 12 м и длиной 36 м. Конструкция здания состоит из трёх шарнирных рам, собираемых из однотипных тонкостенных сталефибробетонных складчатых панелей. На предприятиях СПО "Верево" в Ленинградской области построено несколько таких зданий [123].

В последние годы очень эффективным стало строительство промышленных полов из фибробетона, что способствует снижению материало- и трудоёмкости строительства, стоимости строительства, сокращению объёмов земляных работ, и при этом повышаются качество, эксплуатационная надёжность, и увеличивается межремонтный ресурс конструкций пола. В мире уже построены миллионы квадратных метров фибробетонных промышленных полов и несколько тысяч в России. Достаточно сказать, что сейчас в Германии более 25 % промышленных полов построено из сталефибробетона [98].

В НИИЖБ были разработаны составы фибробетона для защиты ограждающих конструкций различного класса взломоустойчивости. Наиболее интересным объектом является здание ГРКЦ ГУ Центрального банка России в г.Москве. В конструкции пола, стен, колонн, перекрытий применялся сталефибробетон класса В45. Использовалась металлическая фибра отечественного производства [90, 98].

Разработанные ВНИИЖБ нормативные документы позволяют проектировать и изготавливать фибробетонные конструкции различного назначения. При участии ВНИИЖБ были построены такие конструкции, как тон-

костенные элементы тоннелей, плит облицовки фасадов (г. Москва), стеновые панели, кольца смотровых колодцев толщиной 20 мм (г. Вангажи).

В последнее время удалось не только наладить производство, но и применить элементы несъемной опалубки на объектах Московского строительства, карнизные блоки эстакад, лотки водоотводов, плиты перекрытий каналов, элементы мостов и путепроводов и др. Однако объемы производства носят опытный характер, поэтому невелики и не имеют методики обоснованного подтверждения нормативных и расчетных характеристик и свойств применяемого фибробетона.

В зарубежной строительной практике фибробетон нашел более широкое применение по сравнению с нашей страной. В числе производителей фибробетонных конструкций более 15 стран мира: США, Канада, Япония, Германия, Норвегия, Великобритания, Франция, Австралия, Новая Зеландия и др. [76, 90, 98].

О развитии и применении фибробетона за рубежом можно судить по опыту Японии. Количество использованной в Японии стальной фибровой арматуры, например в 1981 г., составило примерно 3000 т, из которых 2500 т изготовлено из углеродистой стали и около 500 т из нержавеющей стали [39]. Исследования фибробетона начали развиваться в Японии еще в 1960-х годах, но с начала 1970-х годов они приняли более систематический характер, нацеленный на практическое применение этого материала. Большинство исследований было связано с изучением бетона, армированного стальными волокнами. Впервые эти волокна появились на строительном рынке в 1973 г. и послужили стимулом для проведения исследований по возможности их применения в дорожных покрытиях и отделке тоннелей. Прекрасные свойства бетона, армированного стальными волокнами, были признаны, и на сегодня увеличилось число конструкций из этого бетона.

Так, в 1980 г. Японская ассоциация по тоннелестроению разработала руководство по проектированию и изготовлению бетона, армированного стальными волокнами, предназначенного для отделки тоннелей. Японское общество инженеров гражданского строительства также подготовило руководство по проектированию и изготовлению бетона, армированного стальными волокнами, для конструкций дорожной одежды и плотин.

Одновременно в Японии институт бетона разработал ряд методов испытаний фибробетона, а также в рамках Японской ассоциации по цементу был учрежден комитет по изучению фибробетона, основными задачами которого явились подготовка руководящих материалов по его производству на заводах товарного бетона, исследование характеристик фибробетона на основе расширяющегося бетона, а также изучение конструкций дорожных покрытий и других конструкций из бетона, армированного стальными волокнами.

Применение же фибробетона в сборных изделиях заводского изготовления позволяет получить элементы небольшой массы, что и обеспечивает отсутствие арматуры в таких конструкциях, как трубы.

На ряде металлургических заводов фибробетон используется при изготовлении покрытий дворов и дорог под тяжелую нагрузку от 60-тонных автомобилей, в качестве основания прокатных блюминговых станков и для создания монолитной огнеупорной футеровки нагревательных печей. Все эти области применения бетона, армированного стальными волокнами, дают хороший результат.

Ремонт поверхности водосливов плотин и напорных тоннелей также осуществляется с использованием бетона, армированного стальными волокнами. Добавление в бетонную смесь примерно 1 % по объему стальных волокон позволяет полностью избежать возникновения трещин в отремонтированных наружных стенах небольших зданий [98].

Анализ показывает, что в зарубежных странах применяются в основном монолитный фибробетон для временных крепей, а также торкретбетон, армированный стальной фиброй, для обделок тоннелей и других подземных сооружений, для ремонтных работ; наиболее интересными примерами применения фибробетона в этой области являются: конструкции перегонных тоннелей метрополитена в Осло (Норвегия); крепь гидротехнического тоннеля диаметром 2,34 м в Карсингтоне (Великобритания); тоннель Хеггура и газопроводные тоннели под дном Северного моря (Норвегия); железнодорожные тоннели в Канаде; коллекторные тоннели метрополитена в Гамбурге (ФРГ) и Лионе (Франция); автодорожный тоннель протяженностью 6,63 км на глубине до 1 км Энасан-2 (Япония) [123].

В строительной практике США фибробетон используется в основном для монолитных полов промзданий, покрытий в аэропортах, а также покрытий дорог и территорий с тяжелым напольным транспортом [30]. Перспективными областями применения фибробетона в США считаются панели типа "сэндвич" с наружными слоями из фибробетона.

Фирмы "Alfanor" и "Norcem Cement" (Норвегия) изготовили опытные партии фибробетонных труб диаметром 800 мм, предназначенных для отвода промышленных и других сточных вод [69]. Волокна из коррозионно- и химически стойкой стали вводили в бетон в количестве 25-30 кг/м³.

В Австралии устройство дорожных покрытий, рассчитанных на интенсивное движение людей и транспорта (полы цехов заводов и фабрик, прачечных, дорожные покрытия), является одной из основных областей применения фибробетона.

Во многих зарубежных странах с целью расширения областей применения фибробетона проводятся исследования его свойств и разрабатываются новые технологии его приготовления. Причем сегодня за рубежом всё большее применение находят фибробетоны с фибровым армированием из синтетических волокон, являющиеся высокомодульными и высокопрочными, коррозионно-стойкими во многих средах. Однако отечественных разработок, помимо работ НИИЖБ, практически нет [90, 98].

1.2. Многокомпонентность бетона как фактор получения бетонов различного функционального назначения

Получение высокопрочных и высококачественных бетонов успешно решается модифицированием их структуры комплексными добавками различного функционального назначения. В ближайшем будущем произойдет постепенное замещение обычных традиционных бетонов многокомпонентными [10, 11].

В таких бетонах используются: индивидуальные химические модификаторы, изменяющие реологические и технологические характеристики бетонных смесей и способствующие повышению физико-механических свойств бетона; комплексные модификаторы, включающие зачастую до нескольких десятков индивидуальных химических добавок и реакционно-активные порошковые минеральные компоненты различной дисперсности, а также другие специальные вещества. Многокомпонентность бетонной смеси позволяет эффективно управлять структурообразованием на всех этапах технологии и получать бетон с различными свойствами. Основным компонентом таких бетонов являются тонкодисперсные добавки – наполнители с высокими пуццоланическими свойствами. К ним относятся прежде всего микрокремнеземы (microsilica, silica-attrab, silica – dumpf), активные высокодисперсные золы, не содержащие несгоревших остатков, дегидратированные каолины и др. Наиболее реакционно-активными из них считаются микрокремнеземы, способные связывать гидролизную известь в процессе твердения цемента в низкоосновные гидросиликаты кальция и значительно повышать прочность и долговечность бетона. В настоящее время номенклатура тонкодисперсных наполнителей высокопрочных бетонов значительно расширена. В их числе предложено использовать измельченные отходы металлургической и энергетической отраслей промышленности, кварцевые пески, известняки и карбонаты, доломиты, отходы от производства бетона, имеющиеся практически во всех регионах страны. Особенно эффективно использование таких добавок в комплексе с суперпластификаторами и армирующими элементами. На основе этих добавок были созданы новые виды высококачественных (Hochleistungsbeton) и (Ultra-Hochleistungsbeton-UHPS) бетонов, самоуплотняющихся бетонов (Selbstverdichtenden Beton-SVB) [8,36,39].

В последние годы при производстве высокопрочных и высококачественных бетонов реализуется концепция использования реакционно-активных мономинеральных и полиминеральных тонкодисперсных порошков на основе горных пород, что ознаменовало появление нового класса бетонов, так называемых Reaktionspulverbeton. Такие бетоны являются многокомпонентными, количество компонентов в них может достигать 7-9 наименований. В них отсутствует крупный заполнитель фракции свыше 10 мм, а мелкий заполнитель – это особо мелкие пески фракции не более

0,125-0,8 мм. Доля каменной реакционно-активной муки в таких бетонах составляет 40-50 % от массы цемента при содержании микрокремнезема до 15-22 %. Водоцементное отношение не превышает 0,09-0,12. Эти бетоны могут быть охарактеризованы как тонкозернистые порошковые бетоны. Содержание воды в тонкозернистых бетонах существенно снижается за счет высокого водоредуцирующего действия суперпластификатора в дисперсных системах. Водоредуцирующее действие в тонкодисперсных порошках может достигать значительных величин (1000-1500 %), т.е. расход воды при одинаковой гравитационной текучести в дисперсных системах может быть снижен в 10-15 раз по сравнению с обычными суспензиями. Замещение части цемента, крупного и мелкого заполнителей тонкодисперсными микропорошками позволяет максимально реализовать разжижающее действие суперпластификаторов на сульфонафталин- и сульфомеламинформальдегидной основе, но в большей степени – на поликарбоксилатной основе. С введением в такие бетоны стальных волокон в количестве 2,0-2,5 % по объему прочность бетона при растяжении может достигать 15-19 МПа, прочность на изгиб – 50 МПа при прочности на сжатие 180-200 МПа [39].

Благодаря своим свойствам ультрадисперсные наполнители (УДМН) находят широкое применение в промышленности строительных материалов, в частности как компоненты новых композиционных вяжущих и бетонов на их основе.

Высокодисперсные наполнители в цементных композициях оказывают положительное влияние на процессы структурообразования, прочность наполненных бетонов и другие физико-механические свойства. Вместе с тем с увеличением прочности бетона значительно повышается его чувствительность к трещинам и снижается надежность бетона. В этой связи особую актуальность приобретает армирование бетона путем введения армирующих добавок. Дисперсное армирование бетона рассматривается как эффективное средство повышения его прочности на растяжение и изменение образования трещин на всех уровнях его структуры, способствующее повышению долговечности и трещиностойкости [39].

Эволюция развития бетона по увеличению количества компонентов и их содержанию представлена на рис.1.

Многокомпонентность современных высокопрочных и высококачественных бетонов требует системного подхода к выбору исходных компонентов для его приготовления с целью создания материала различного функционального назначения [36]. С учетом предлагаемого системного подхода разработаны современные многокомпонентные высококачественные бетоны различного функционального назначения:

✓ быстротвердеющие высокопрочные бетоны для беспрогревных и малопрогревных технологий. Методологические и технологические основы получения таких бетонов заключаются в установлении основных прин-

ципов формирования высокой ранней суточной прочности цементного камня и бетона, учитывающих высокую реологическую и водоредуцирующую функции суперпластификатора и концентрационную чувствительность цементов по отношению к С-3. В работе [29] рассматривается классификационная оценка цементов, позволяющая оптимизировать выбор цементов для беспрогревных и малопрогревных бетонов по количественному показателю – относительной суточной прочности. Установлена концентрационная чувствительность цементов к дозировкам СП по показателю суточной прочности. В зависимости от величины этого показателя промышленные цементы подразделены на 3 класса. По предлагаемой классификации цементы первого класса должны обеспечить этот показатель не менее 1,0, второго класса – от 0,5 до 1,0 и третьего класса – не менее 0,5.

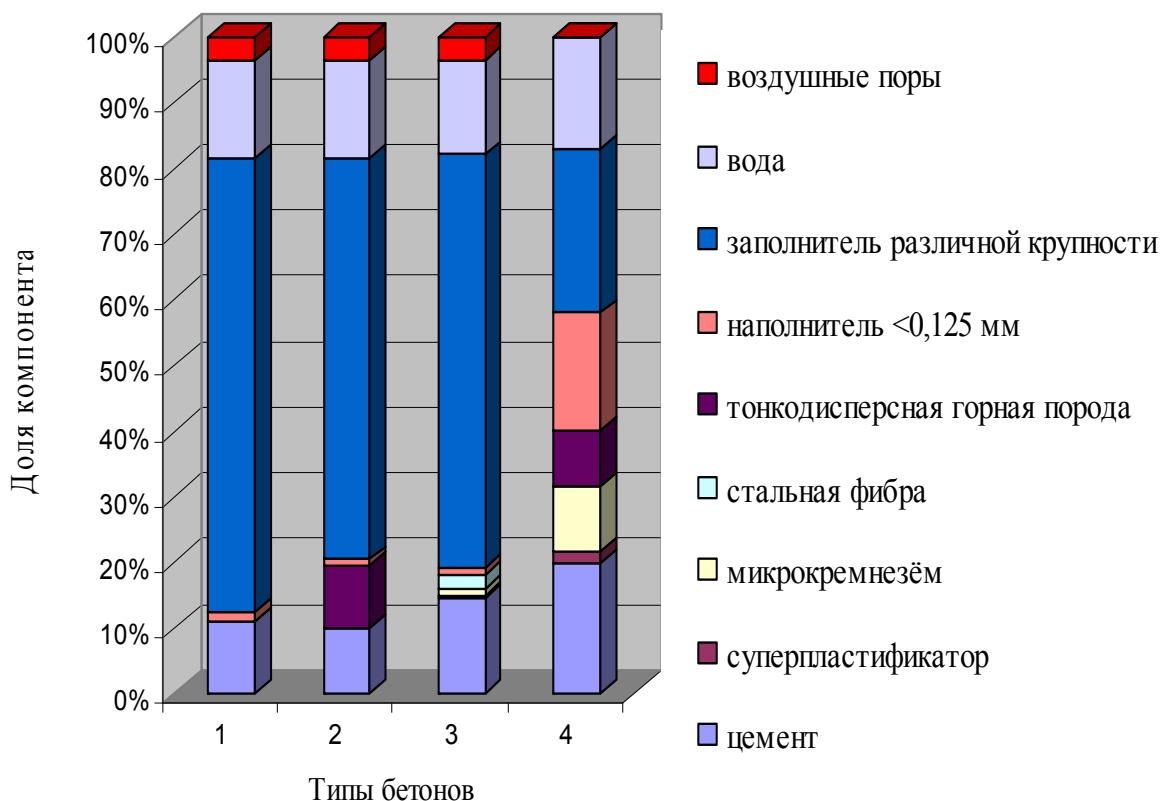


Рис. 1.1. Эволюция развития бетона:
 1 – обычный тяжёлый бетон; 2 – самоуплотняющийся бетон;
 3 – высококачественный бетон; 4 – реакционно-порошковый бетон

✓ многокомпонентные быстротвердеющие высокопрочные бетоны повышенной гидрофобности, предназначенные для ремонта и восстановления дорожных одежд. Многофункциональность разрабатываемого бетона, а именно обеспечение высокой ранней прочности и повышенной гидрофобности, достигалась путем использования комплексных органоминеральных модификаторов, содержащих в своем составе высокоэффектив-

ный пластификатор, гидрофобизирующий компонент и высокодисперсный реакционно-активный наполнитель на основе измельченных силицитовых горных пород [38].

✓ дисперсно-армированный высокопрочный бетон повышенной трещиностойкости.

В последние годы активно внедряются в строительство многокомпонентные мелкозернистые бетоны. Ранее их применение сдерживалось некоторыми особенностями структуры и свойств. Использование в качестве заполнителя только песка вызывало значительное увеличение удельной поверхности заполнителя и его пустотности. Для получения равноподвижных бетонных смесей слитной структуры по сравнению с бетоном на крупном заполнителе требовалось на 15-25 % увеличивать расходы воды и цемента. В свою очередь, в последующем это приводило к возрастанию усадки бетона. Существовавшие жесткие требования по ограничению расхода цемента в бетоне сдерживали применение мелкозернистых бетонов в строительстве, хотя в ряде регионов (Заполярье, города Бухара, Ташкент и др.), учитывая специфические условия строительства, мелкозернистые бетоны с успехом использовали для возведения различных сооружений и зданий [6, 7, 8].

В современных условиях изменились технические и экономические предпосылки использования бетонов в строительстве. Появились и с каждым годом все шире применяются в технологии бетона композиционные вяжущие, суперпластификаторы и другие эффективные модификаторы структуры и свойств бетона, а также тонкодисперсные минеральные наполнители. Решающим фактором в рыночной экономике стало качество и стоимость материала, скорость возведения объектов, расширение архитектурно-строительных решений на основе применения новых бетонов. Экология цемента отошла на второй план, перестала быть самодавлеющим фактором. Вместе с тем новые технико-технологические возможности, особенно переход от обычных бетонов к многокомпонентным составам с широким использованием суперпластификаторов, тонкодисперсных наполнителей и других добавок, позволили свести к минимуму расход воды и цемента в мелкозернистых смесях и резко уменьшить усадку материала, получая в ряде случаев безусадочные мелкозернистые бетоны [7].

Мелкозернистость структуры материала обладает рядом достоинств, среди которых можно назвать следующие:

- возможность создания тонкодисперсной однородной высококачественной структуры без крупных включений крупных зерен иного строения;

- высокую тиксотропию и способность к трансформации бетонной смеси;

- высокую технологичность – возможность формирования конструкций и изделий методом литья, экструзии, прессования, штампования, набрызга и др.;
- легкую транспортируемость;
- возможность широкого применения сухих смесей с гарантией высокого качества;
- возможность получения материалов с различными комплексами свойств;
- получение специальных видов материала: фибробетона, армоцемента, декоративного, электропроводящего, гидроизоляционного и др.;
- возможность разработки новых архитектурно-конструктивных решений (тонкостенные и слоистые конструкции, изделия переменной плотности, гибридные конструкции т.д.);
- многофункциональность материала, т.е. возможность на определенном цементе и песке только за счет варьирования состава, использования комплекса добавок и с помощью технологических приемов получить конструкционный теплоизоляционный, гидроизоляционный, декоративный и другие виды бетона;
- возможность широкого применения местных материалов и, как правило, более низкая себестоимость мелкозернистого бетона по сравнению с классическим крупнозернистым бетоном.

При внедрении мелкозернистых бетонов в строительстве необходимо учитывать особенности зависимостей их свойств от структуры бетона и свойств используемых составляющих компонентов. На прочность мелкозернистого бетона, как и обычного крупнозернистого бетона, оказывают определяющее влияние активность цемента и водоцементное отношение. Однако прочность мелкозернистого бетона во многом зависит от качества песка и состава, т.е. соотношения между цементом и песком.

Применение других материалов и модификаторов структуры и свойств изменит количественные показатели прочности мелкозернистого бетона. Наиболее экономичными и эффективными с точки зрения использования цемента и получения оптимальной структуры являются составы 1:2-1:3 (оптимальное соотношение зависит от качества песка и применяемых добавок).

Разработка многокомпонентных высокопрочных и высококачественных бетонов различного функционального назначения обеспечивает неограниченные возможности использования их в строительном комплексе. Полученные новые показатели физико-механических и эксплуатационных свойств многокомпонентных высокопрочных бетонов могут быть использованы для накопления банка данных с целью создания нормативной базы при проектировании конструкций из высокопрочного бетона [7].

1.3. Усадка и усадочная трещиностойкость цементного камня и бетона как фактор долговечности конструкционного материала. Классификация усадки

Основным параметром любого конструктивного материала является долговечность, то есть его способность в определенных условиях внешнего воздействия не изменять свои свойства. При этом большинство материалов теряют свои свойства вследствие развития в них дефектов в виде трещин, разделяющих их на отдельные элементы, не способные противостоять воздействиям внешней среды. Для высокопрочных бетонов зарождение и развитие в них трещин при нагружении, а также долговечность в процессе попеременного увлажнения и высушивания, замораживания и оттаивания определяют деформации усадки и набухания.

В настоящее время накоплен значительный фактический материал об объемных изменениях цементного камня и бетона [2-4, 9, 11, 21, 32, 59, 67, 85]. Деформации бетона в зависимости от факторов воздействия окружающей среды и причин их возникновения целесообразно классифицировать на: собственные, происходящие при гидратации цемента и формировании структуры бетона, и вынужденные, являющиеся результатом внешних воздействий окружающей среды различной природы (силовые, температурные, влажностные и др.).

В свою очередь, собственные напряжения в бетоне делятся на собственные (внутренние), или, по терминологии авторов [82, 91, 93], «напряжения первого рода», и структурные – «напряжения второго рода», обусловленные анизотропией структуры бетона.

Собственные деформации обусловлены процессами структурообразования бетона и являются неотъемлемой частью этого процесса. К ним относятся деформации экзотермического и химического расширения, а также химической контракции [82, 91, 93].

Вынужденные деформации – это деформации, образованные в результате внешнего воздействия на бетон, и в отличие от собственных деформаций могут быть исключены посредством устранения этого воздействия. К вынужденным относятся силовые деформации, в том числе динамические и статические, а также температурные, коррозионные и влажностные [82, 91, 93]. Поскольку вынужденные деформации, такие, как силовые, могут быть исключены из процессов формирования бетона (на этапе достижения марочных показателей), их структурообразующая роль при проведении исследований не изучалась, а учитывалось только их влияние на процесс разрушения бетона.

Как собственные, так и вынужденные деформации бетона играют важную роль в формировании его структуры. Исключить собственные деформации из процесса формирования структуры бетона, в отличие от вынужденных деформаций, нельзя, можно только регулировать их величину

и, таким образом, регулировать процесс структурообразования. Развитие вынужденных деформаций, обусловленных влажностной усадкой, вызывает в структуре бетона напряжения, в ряде случаев сопоставимые с пределом прочности, что приводит к образованию усадочных трещин, снижению жесткости конструкций и потере их долговечности [82, 83].

Исследованию закономерностей развития усадочных деформаций цементного камня и бетона посвящены работы И.Н. Ахвердова, С.В. Александровского, О.Я. Берга, А.Е. Десова, Р. Лермита, Н.А. Мощанского, Ю.А. Нилендера, З.Н. Цилосани, А.Е. Шейкина и др. [2-6, 10, 11, 19-21, 41, 67, 79, 85-87, 121, 126-130].

Усадка бетона связана с химическими и физическими процессами, происходящими при взаимодействии цемента с водой, изменением влажности цементного камня при его высыхании, а также карбонизацией. В связи с этим различают три разновидности составляющих усадки бетона: влажностную, карбонизационную и контракционную. Для оценки этих составляющих усадки и их роли в структуре бетона рассмотрим физическую природу каждой.

Особый предмет исследований составляют влажностные деформации цементного камня, результаты исследования которых представлены в работах С.В. Александровского, К.С. Карапетяна, Р. Лермита, Р.Л. Майлян, Р. Мейер, Н.А. Мощанского, Ю.А. Нилендера, Т. Пауэрса, В. Рачамандран, З.Н. Цилосани, А.Е. Шейкина и др. [2-6, 21, 59, 67, 72, 74, 79, 85-87, 92, 102, 121, 126-130].

Влажностная усадка вызывается изменением распределения влаги, её перемещением в цементном камне и испарением. Усадочные напряжения возникают при отсутствии гигроскопического равновесия с воздухом, при этом влажный капиллярно-пористый бетон высыхает, значительно уменьшаясь в объеме. Вследствие малости коэффициента диффузии влаги его высыхание происходит неравномерно, поэтому образуются градиенты влажности, ведущие к усадочным напряжениям.

Влажностная усадка по своей природе различна и складывается из капиллярной и адсорбционной составляющих. Испарения воды начинаются из крупных пор и капилляров, затем из микропор и мелких капилляров. При этом возникают силы капиллярного сжатия, в связи с чем цементный камень претерпевает деформацию сжатия. Возникающая вследствие этого усадка носит название капиллярной. После удаления капиллярной воды начинает удаляться адсорбционная и структурно-связанная вода. Первоначально исчезает вода из ячеек, образованных мелкими кристаллами продуктов гидратации цемента из полимолекулярно-адсорбированных слоев, а затем вода, адсорбированная в виде мономолекулярных слоев; данный процесс, как правило, сопровождается значительным сжатием цементного камня. Развивающуюся при этом усадку называют адсорбционной.

Значительное число исследований свидетельствуют, что физическая природа влажностной усадки раскрыта не полностью [59, 126-128]. Природа различных превращений, происходящих в цементном камне и бетоне и связанных с изменениями их влажности, описана в работе З.Н. Цилосани [121]. Основной причиной развития усадочных деформаций, по его мнению, считаются капиллярные явления. Признавая капиллярные явления, некоторые авторы [5, 6, 67, 89, 158] придают значение и стабилизирующему действию тонких пленок воды в межзерновом пространстве [67].

По современным представлениям, усадка обусловлена действием как капиллярных сил, так и сил, возникающих при удалении «межслоевой воды» из слоев, образовавшихся между кристаллами новообразований цементного камня [70, 160]. Другие исследователи, не отрицая этого, предполагают и физико-химический характер усадки. При этом усадка обусловлена удалением межкристаллической воды [67, 156, 159] и объемными изменениями гелевой структурной составляющей цементного камня при его высыхании [5, 9, 117].

Согласно З.Н. Цилосани, капиллярная усадка цементного камня прямо пропорциональна капиллярной пористости и среднему диаметру капилляров. Чем выше капиллярная пористость и чем меньше средний радиус капилляров, тем больше капиллярная усадка цементного камня [121].

По мнению СВ. Александровского, А.Е. Шейкина, Л.М. Щербакова, капиллярная составляющая усадки связана с микроскопическими искривлениями поверхности жидкости на границе раздела фаз, а изменения молекулярного давления при этом не велики и носят второстепенный характер [5, 6, 127, 128, 133].

В настоящее время разработано и сформулировано значительное количество гипотез и теорий, объясняющих природу усадочных деформаций цементного камня и бетона.

Наибольшим признанием пользуется структурная теория А.Е. Шейкина [127, 129]. По его мнению, максимальная усадка влажного цементного камня проявляется только в условиях квазистатической сушки, когда усадочная деформация протекает равномерно по всему объему в полном соответствии с изменением его влагосодержания [126].

Основным положением гипотезы А.Е. Шейкина является наличие в цементном камне таких структурных составляющих, как кристаллический сросток и гель, который заполняет скелет кристаллического сростка и при высыхании дает значительную усадку. В соответствии со структурной теорией усадки А.Е. Шейкина усадочные деформации тем больше, чем больше объем геля в единице объема кристаллического сростка цементного камня. Величина усадки зависит от содержания в цементном камне крупных кристаллов новообразований, создающих каркас и уменьшающих усадочные деформации.

В то же время усадка бетона определяется не только испарением межплоскостной воды из тоберморитового геля. По данным А.Е. Шейкина, эта вода удаляется только при относительной влажности менее 45 %, так как зависит от степени заполнения порового пространства цементным гелем. В условиях квазистатической сушки из цементного камня начинает удаляться и абсорбционно-связанная влага, которая удерживается на поверхностях кристаллов тоберморита ван-дер-ваальсовыми силами ориентированного взаимодействия. При удалении адсорбционно-связанной воды усадка принимает частично необратимый характер, так как на определенном этапе твердения цемента между частицами тоберморитового геля могут возникать ковалентные и ионные связи [126].

При относительной влажности воздуха менее 45 % удаляется влага, находящаяся между слоями кристаллической структуры гидросиликатов кальция. Испарение межплоскостной воды из тоберморитового геля сопровождается значительной усадкой цементного камня, причем чем меньше относительная влажность воздуха и выше температура, тем больше количество удаленной влаги и тем выше усадка цементного камня [126, 127].

Дж. Бернал исходя из слоистого характера строения гидросиликатов кальция полагает, что большая часть воды, испарение которой из цементного камня сопровождается усадкой, находится между слоями структуры гидросиликата кальция. В связи с этим основной причиной усадки, по его мнению, является испарение межплоскостной воды из тоберморитового геля [23]. Теорию Дж. Бернала разделяют Ф. Ли и другие ученые [68, 69, 102, 150].

Исследования, проведенные Г. Калоусеком, показали, что испарение воды из межслоевого пространства кристаллов тоберморита и тоберморитовых фаз, каким является CSH (В), сопровождается интенсивной усадкой при наиболее низкой относительной влажности воздуха. Причем силы, освобождающиеся при испарении воды из гелевых пор, а также из слоистых кристаллов гидросиликатов кальция, настолько значительны, что не только компенсируют набухание системы после исчезновения капиллярных сил, но и вызывают дополнительные деформации усадки [148].

По мнению автора [49], силы Ван-дер-Ваальса, адсорбционно удерживающие воду в гелевых порах, освобождаются при ее испарении и вызывают усадку цементного камня. Причиной его усадки на конечной стадии высыхания является испарение воды из кристаллов гидросиликатов кальция. Причем некоторые из них, обладая слоистой кристаллической решеткой, способны отдавать и принимать определенное количество воды, заключенной между слоями решетки, что сопровождается соответствующими изменениями расстояний между слоями.

В частности, по данным [49], гидросиликаты кальция с соотношением C/S = 0,8-1 и содержанием до 2,5-2,8 молекулы воды на одну молекулу SiO₂ ступенчато теряют часть воды при относительной влажности воздуха

35 %. Остальная часть связанной воды постепенно удаляется при дальнейшем снижении влажности окружающей среды.

Теория, сформулированная И.Н. Ахвердовым [10, 11], сводится к тому, что при твердении цементного геля внутри образующихся кристаллов молекулы воды группируются вокруг ионов кальция и других минералов. При этом создаются новые сорбционные объемы и размеры кристаллов увеличиваются. При десорбции паров воды происходит обратное явление. Изменения, вызванные адсорбцией и десорбцией паров воды, приводят к изменению микроразмеров всей структуры.

Таким образом, уменьшение объема цементного камня при высыхании вызывается рядом причин:

- действием капиллярных сил, возникающих в цементном камне при испарении воды из капилляров;
- удалением адсорбционно-связанной воды из тоберморитового геля;
- структурными изменениями, происходящими при превращении вязко-пластического цементного геля в камневидное состояние и при нарушении гигроскопического равновесия в его порах.

Обобщая литературные данные о механизме и причинах рассматриваемых объемных изменений цементного камня и бетона, можно сделать следующее заключение .

Деформации усадки цементного камня связаны с обезвоживанием субмикроструктур его гелевидной составляющей. Отдача ими пленочной воды вызывает уменьшение толщины пленок, сближение кристаллов и усадку гелевой составляющей, которая обуславливает общую усадку цементного камня. При обводнении субмикроструктур гелевидной составляющей цементного камня толщина водных пленок вокруг них увеличивается, в результате чего происходит их раздвижка и, следовательно, увеличение объема цементного камня, то есть его набухание [10].

Изменение содержания воды в капиллярах и порах цементного камня вызывает изменения сил капиллярного давления, которое сжимает или расширяет скелет цементного камня. Так, с уменьшением водосодержания происходит ослабление этих сил и увеличение объема цементного камня. В результате развиваются деформации усадки и набухания цементного камня.

Не менее важной считается и вторая составляющая суммарной усадки - карбонизационная усадка, которая изучалась многими зарубежными [102, 159] и отечественными [110] учеными. Наиболее ранние исследования карбонизационной усадки были выполнены Ф. Ли [68, 69, 150].

Карбонизационная усадка является следствием уменьшения объема затвердевшего цементного камня в результате химического взаимодействия гидроксида кальция с углекислым газом, содержащимся в воздухе [3, 102, 110]. Карбонизация сопровождается потерей значительного количества химически связанной воды в результате образования кремнекислоты. Чем

выше степень карбонизации материала, тем больше его деформации усадки. Интенсивность процесса карбонизации, протекающего на воздухе в бетоне различной плотности, по данным А.А. Байкова и В.М. Москвина, достигает 1-5 мм в год. Поэтому значительное увеличение усадки при воздействии углекислого газа происходит только после длительного выдерживания бетона на воздухе.

Достаточно подробно физико-химическая природа карбонизационной усадки описана в трудах Т.С. Пауэрса [92]. По его мнению, величина карбонизационной усадки в значительной степени зависит от размеров образца и может достигать $50 \cdot 10^{-5}$ мм/м. По данным Вербека [159, 160], величина карбонизационной усадки почти равна величине влажностной, а суммарная примерно в два раза больше влажностной усадки. Это признается и другими учеными [2, 4, 148, 150, 152-153, 156].

Из анализа литературных данных известно несколько различных теоретических представлений о механизме карбонизационной усадки. Считаем необходимым выделить три гипотезы – Пауэрса, Рамачандрана – Фельдмана и Свенсона – Середы. В каждой из рассматриваемых гипотез важная роль отводится гидроксиду кальция.

В соответствии с гипотезой Пауэрса [155] карбонизационная усадка обусловлена растворением кристаллов гидроксида кальция, когда последний находится под капиллярным давлением, вызванным эффектом менисков в матрице С–S–Н-фазы при относительной влажности воздуха менее 50 %.

Карбонат кальция осаждается в тех местах, которые не находятся под давлением. Ионы кальция из С–S–Н реагируют с углекислым газом топомехимически; поэтому карбонизация С–S–Н не приводит к усадке, поскольку не происходит растворения этой фазы. Хотя гидроксид кальция при высокой влажности растворяется, кристаллы гидроксида кальция не сжаты матрицей С–S–Н, так как сжимающий эффект, обусловленный наличием менисков, пренебрежимо мал, соответственно минимальна и величина усадки. При низкой относительной влажности растворяется незначительное количество гидроксида кальция, что способствует уменьшению карбонизационной усадки цементного камня.

Кристаллы карбоната кальция сдерживают развитие влажностной усадки, обусловленной удалением влаги, при высыхании цементного камня после карбонизации. Поскольку карбонат кальция менее сжимаем и имеет меньшую плотность, чем гидроксид кальция, его образование сопряжено с некоторым снижением влажностной усадки образцов [155].

По гипотезе Рамачандрана – Фельдмана [102], гидроксиду кальция придается более значительная роль, и в этом их взгляды, несомненно, расходятся с представлениями Пауэрса. Согласно их гипотезе, кристаллы гидроксида кальция растворяются и переносятся путем ионной диффузии в

сорбированной воде, при этом в структуре возникают пустоты, в которых происходит укрупнение кристаллов за счет ван-дер-ваальсовых сил.

В соответствии с гипотезой Свенсона – Середы карбонизационная усадка является результатом последовательно протекающих технологических циклов, каждый из которых состоит из двух полуциклов: увлажнения и высушивания [102]. При этом локальное скопление влаги представляет собой первую (влажностную) половину цикла. Его вторую половину (высушивание) обеспечивают относительно непроницаемые пленки карбоната кальция, экранирующие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и поэтому тормозящие процесс его карбонизации. В результате появляется возможность удаления накопившейся влаги в атмосферу. Разрушение экранирующих пленок при высушивании приводит к дальнейшему протеканию реакции карбонизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Таким образом, механизм усадки, по гипотезе Свенсона – Середы, заключается в растворении $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в точках контакта кристаллов и образовании новых связей при выпадении продукта реакции на новых участках. При этом имеют значение и капиллярные силы, приводящие к сжатию структуры за счет эффекта менисков, и силы Ван-дер-Ваальса, поскольку они обеспечивают плотную упаковку частиц [102].

Авторы рассматриваемых гипотез предположили также, что участие С–S–Н-фазы в карбонизационной усадке включает полимеризацию кремнезема, аналогичную той, которая была описана С.М. Ленцем [151].

Таким образом, карбонизационная усадка гидратированного портланд-цемента есть результат как физических, так и химических процессов. Нестабильность С–S–Н-фаз обусловлена несколькими причинами: образованием неупорядоченных, плохо закристаллизованных продуктов с невысокой пористостью и значительной напряженностью в точках их контактов. При их разрушении высвобождается потенциальная энергия. Существенны также дефектность цепочек из SiO_2 -тетраэдров и их полимеризация. Эти процессы, развивающиеся во времени, приводят к усадке капиллярно-пористых систем, таких, как цементный камень.

Значительная усадка при карбонизации С–S–Н-фаз свидетельствует о той важной роли, которую играет в ней CO_2 , связанный с С–S–Н. Разрушение С–S–Н в присутствии влаги и CaO_2 лежит, таким образом, в основе процесса, приводящего к большой усадке. Однако выщелачивание гидроксида кальция из насыщенных водой цементных паст не вызывает усадочных деформаций.

Очевидно, молекулы воды уменьшают силы, вызывающие усадку, и стабилизируют С–S–Н. По-видимому, молекулы воды обеспечивают эффект стабилизации С–S–Н путем протекания в пустоты структуры цементных паст, освободившиеся в результате выщелачивания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [102].

Значительные деформации усадки в уплотненном гидроксиде кальция (свободном от CO_2) имеют место только при низкой влажности. В

присутствии CO_2 максимальная усадка наблюдается при 50 % относительной влажности воздуха. Возможное объяснение этой аномалии сводится к тому, что нестабильность, присущая кристаллам $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в точках их контакта друг с другом, проявляется тем в большей степени, чем выше растворимость кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в среде, содержащей CO_2 .

Контракционная составляющая усадки цементного камня носит физико-химический характер и связана с уменьшением объема системы «цемент – вода» при возникновении гидратных новообразований как в момент схватывания, так и в начальный период твердения цементного камня [2-6]. При этом происходит уплотнение воды в тонких адсорбционных слоях, а следовательно, и сжатие системы. Это уменьшение объема принято считать контракцией цементного камня.

По мнению В.В. Некрасова [80, 81], в основу контракционного эффекта положена чисто химическая природа, и объемный процесс контракции обусловлен образованием гидросиликатов кальция.

Б.Г. Скрамтаев [112] высказал предположение, что контракционный эффект сопровождается появлением вакуума в твердеющем цементном камне и бетоне. В опытах, поставленных Б.Г. Скрамтаевым, установлено, что наибольшее разрежение достигается за первые 2-4 суток твердения и имеет тенденцию к увеличению с повышением активности и тонкости помола цемента. Аналогичные опыты по изучению явления контракции были проведены Н.А. Мощанским [79]. Вместе с тем контракционная усадка, несомненно играющая существенную роль в технологии бетона, не имеет большого практического значения, так как она мала по сравнению с влажностной усадкой и развивается в значительной своей части в раннем возрасте бетона, когда последний обладает пластичностью. По данным авторов [83, 84, 90], контракционная составляющая усадки невелика и с течением времени релаксирует. Такого же мнения придерживается О.Я. Берг. По его данным, контракционная усадка развивается в раннем возрасте бетона и на работу конструкций оказывает значительно меньшее влияние. В связи с этим наиболее важным является экспериментальное изучение величин влажностной и карбонизационной усадки [19-21]. Мы предложили явление усадки высокопрочных бетонов рассматривать в зависимости от двух процессов: высыхания и карбонизации.

Среди основных факторов, определяющих долговечность конструкций, можно назвать развитие в них трещин, не связанных с механической нагрузкой на конструкцию. Трещины являются началом разрушения структуры бетона. Они создают канал для проникновения агрессивных агентов в глубь бетона и приводят к интенсификации развития деструктивных процессов в бетоне и стальной арматуре. Основная причина появления трещин в бетоне – его усадка.

Развитие усадочных деформаций и связанные с этим внутрискруктурные напряжения вызывают образование микро- и макротрещин в

бетоне. В более поздние сроки твердения бетона значительные усадочные деформации способствуют возникновению и росту дефектов, что приводит к понижению трещиностойкости и долговечности бетона [93]. Не случайно профессором В.М. Москвиным предложена классификация трещин в бетоне в зависимости от их вида и происхождения, согласно которой трещины делятся на: силовые, усадочные, температурные и коррозионные. Усадка приводит также к возникновению различного рода трещин вблизи предварительно напряженной арматуры, что негативно влияет на процесс эксплуатации преднапряженных конструкций [19-21, 95]. Поэтому при рассмотрении трещиностойкости высокопрочных бетонов прежде всего остановимся на освещении вопросов, связанных с развитием их усадки.

1.4. Основные закономерности развития усадочных деформаций в зависимости от рецептурно-технологических факторов

Основными факторами, определяющими усадку бетона, являются вид и химико-минералогический состав используемых цементов, тонкость его помола, количество в цементе гипса и других минеральных солей, вид и количество вводимых добавок, параметры окружающей среды (относительная влажность и температура воздуха) [3, 4, 44, 63, 65, 99, 129, 130]. Усадка цементного камня и бетона во многом зависит также от его состава, в частности водоцементного отношения и расхода цемента на 1 м бетона, вида применяемых заполнителей [7, 129, 132, 133, 134, 135]. Влияние перечисленных факторов оказывает неоднозначное влияние на конечную усадку и на характер ее протекания во времени. В общем виде влияние технологических факторов на процесс усадки можно представить функцией нескольких переменных [67]:

$$\Delta = qEC_H, \quad (1.1)$$

где E – полное количество испарившейся воды; C_H – количество гидратизированного цемента; q – коэффициент, зависящий от природы последнего и от состава бетона.

В настоящее время накоплен значительный фактический материал о влиянии химического и минералогического состава цементов на усадку бетонов и растворов. В работах В.А. Кинда, С.Д. Огорокова, С.Л. Вольфсона, А.Е. Шейнина, М.И. Гершмана, М. Венюа и др. представлены результаты исследований усадки бетонов, изготовленных на 300 цементах, в которых содержание основных минералов клинкера, щелочей и серного ангидрита SO_2 колебалось в пределах, характерных для обычных портландцементов [134].

Высокосортные, тонкомолотые, высокоалюминатные цементы обладают большей усадкой, особенно в начальный период твердения, по

сравнению с портландцементами. Так, например, по данным Гленвила [147], глиноземистый цемент в возрасте 7 суток твердения показал усадку, достигающую почти 40 % от величины усадки в возрасте 1,5 года. Усадка цементного камня на рядовых портландцементов не превышала за это время 8 % полуторагодовой усадки.

Результаты исследований А.А. Ананенко свидетельствуют о том, что, варьируя химические и минералогические составы цементов, можно изменять величину усадки бетонов более чем в два раза [7, 8].

П.А. Ребиндер, Е.Е. Сегалова [104] и др. считают, что цементы с малым содержанием SO_3 в начальный период твердеют значительно медленнее, чем цементы с высоким содержанием SO_3 . В изолированных образцах именно большей степенью гидратации цемента с увеличением содержания SO_3 можно объяснить возрастание усадки, вызванной концентрацией гидратирующего цемента.

М. Шпиндель [157], исследуя контракционную усадку цементного теста с момента затворения, установил, что цементы более тонкого помола имеют усадку, гораздо большую, чем цементы рядового помола. При этом значительная часть усадочных деформаций реализуется до конца схватывания. Абсолютная величина этой усадки превышает усадку цементного камня, реализованную за месячный срок твердения.

По данным Ю.А. Нилендера [85-87], контракционная усадка бетона, называемая им «собственной усадкой», оказалась в 5-10 раз меньше влажностной усадки, обусловленной его высыханием.

Значительное влияние на деформации усадки оказывает минералогический состав цемента. Наибольшей усадкой характеризуются C_3A и C_2S . Алит и алюмоферрит оказывают наименьшее влияние на усадку. По данным Стейнора [105], усадка C_3A в возрасте 28 суток достигает 0,46 мм/м, C_2S – 0,77 мм/м, C_3S – 2,34 мм/м и C_4AF – 0,49 мм/м.

Наибольшей усадкой на протяжении всех сроков испытания отличаются белитовые цементы, наименьшей – алюминатные. Причем белитовые цементы характеризуются меньшей усадкой в ранние сроки твердения, а затем их усадочные деформации возрастают и в возрасте 1 год их величина достигает величины усадки алюминатных цементов. Промежуточное положение занимают алитовые и алюмоферритовые цементы. Таким образом, усадка цементного камня при надлежащем выборе минералогического состава цемента может быть значительно уменьшена. М. Венюа [27], изучая усадку 13 видов цементов, характеризующихся различным минералогическим составом (C_3S – 41,1-74,7 %; C_2S – 5,9-32,4 %; C_3A – 0,1-12,5 %; C_4AF – 1,6-16,5), установил, что в возрасте 1 года усадочные деформации различных цементов могут различаться более чем в два раза.

В соответствии с рекомендациями [60], все промышленные цементы по величине усадочных деформаций подразделяются на 4 группы – от низкоусадочных (менее 1 мм/м) до высокоусадочных (более 3,5 мм/м):

усадка цемента первой группы – не более 1 мм/м; второй – 1-2 мм/м; третьей – 2-3,5 мм/м и четвертой – свыше 3,5 мм/м. Таким образом, для практических целей желательно классифицировать цементы и по величине усадочных деформаций, т.е. наряду с активностью цементы могут характеризоваться и их «маркой усадки».

Обобщая результаты выполненных исследований по влиянию химического и минералогического составов цементов на усадку цементного камня, авторы [30, 134, 135] предлагают качественную оценку усадочных свойств цементного камня по величине параметра P :

$$P = C_3A + 8(Na_2O + K_2O) + 0,05C_2S, \quad (1.2)$$

где C_3A , $(Na_2O + K_2O)$ и C_2S – содержание в цементе соответственно трехкальциевого алюмината, щелочей и белита, %.

Выражение (1.2) справедливо для оценки усадочных свойств бетонов в случае вибропрессования и, по-видимому, приемлемо в тех случаях, когда измерения усадки ведутся на образцах без гидроизоляции.

Радикальным способом устранения отрицательных последствий усадки в бетоне является применение в качестве вяжущего напрягающего цемента (НЦ), состоящего из портландцемента, алюмосодержащего компонента и гипса [45]. Напрягающие цементы предназначены для создания в бетоне деформаций расширения, равных или незначительно превышающих деформации усадки, что повышает способность бетона сопротивляться комплексу силовых и несиловых воздействий в условиях эксплуатации.

Бетоны на НЦ отличаются от бетона, изготовленного на обычных цементах, повышенными механическими характеристиками и стойкостью к температурным, влажностным и коррозионным воздействиям [43]. Использование напрягающего цемента позволяет получить бетоны с компенсированной усадкой, характеризующиеся улучшенными прочностными и деформативными показателями.

Разработка специальных цементов для особовысокоплотных бетонов открывает принципиально новые возможности получения бетонов с минимальными деформациями усадки. Уже первые опыты по изучению гранулометрического состава вяжущих, выполненные в 1970-х годах, выявили значительные резервы снижения водоцементного отношения и, как следствие, уменьшения деформаций усадки [12, 14].

Выдающимся достижением является создание так называемых DSP-композитов (уплотненные системы), содержащих гомогенно распределенные ультрамалые частицы цемента, микрокремнезема, заполнителя и микроволокна. Эти материалы, за счет специальных технологических приемов, при $В/Ц = 0,12-0,22$ позволяют достичь высокую плотность и минимальные деформации усадки [12].

Следующим шагом стало получение так называемых MDF-цементов (цементы, свободные от макродефектов). Берчелл с сотрудниками в начале

1980-х годов установили, что при каландрировании цементов в присутствии суперпластификаторов и гелеобразователей (например поливинилацетата) при В/Ц = 0,10-0,18 можно получить композиты, имеющие чрезвычайно плотную микроструктуру без капиллярных пор [12]. Очевидно, что бетоны на таких цементах с чрезвычайно низкой пористостью и высокой плотностью цементной матрицы будут характеризоваться и низкими показателями усадки. Снижение пористости и повышение плотности бетона являются определяющими факторами при разработке и создании малоусадочных бетонов.

Опираясь на теоретические представления о преобладающем влиянии влажностной составляющей в полной усадке бетона, логично предположить, что фактор водосодержания и В/Ц-отношение будут играть определяющую роль. В этой связи высокоплотные и высокопрочные бетоны с низкими В/Ц-отношениями характеризуются низкими показателями пористости и, как следствие, малыми деформациями усадки. С повышением В/Ц-отношения и увеличением пористости происходит более интенсивный влагообмен цементного камня с внешней средой, снижается сопротивление его кристаллического сростка объемным изменениям геля [138]. И наоборот, при малых В/Ц-отношениях и снижении пористости указанные обстоятельства действуют в обратном направлении, что сказывается на уменьшении усадки.

Для описания усадки цементного камня и бетона в зависимости от влагосодержания и В/Ц-отношения различными исследователями предложен ряд эмпирических формул. Если полагать, что свободная усадка цементного камня ε_y^c пропорциональна количеству испаряемой из тоберморитового геля адсорбционно-связанной воды B^a , то свободная усадка цементного камня в условиях квазистатической сушки может быть описана следующим уравнением [126]:

$$\varepsilon_y^c = CV_r B^a, \quad (1.3)$$

где C – коэффициент пропорциональности; V_r – объем тоберморитового геля в единице объема цементного камня.

Так как кристаллический сросток цементного камня будет препятствовать усадке тоберморитового геля, то проявившаяся полная усадка цементного камня $\varepsilon_y^п$ будет равна:

$$\varepsilon_y^п = \frac{\varepsilon_y^c}{1 + nk}, \quad (1.4)$$

где n , k – коэффициенты, характеризующие показатели кристаллического остатка и тоберморитового геля:

$$n = E_c/E_r \text{ и } k = S_c/S_T,$$

где E_c – модуль упругости кристаллического сростка; E_r – начальный модуль упругости тоберморитового геля; S_T, S_c – площади, соответственно тоберморитового геля и кристаллического сростка.

Формула (1.4) получена при допущении, что структурные составляющие цементного камня обладают совершенной упругостью и имеют постоянные модули упругости.

По данным зарубежных исследований [137, 139, 141, 142], суммарное влияние технологических параметров на усадку тяжелого неармированного бетона оценивается по следующей формуле:

$$\varepsilon_y \cdot 10^6 = \frac{5B/C}{1+m} \cdot (667 + C), \quad (1.5)$$

где B и C – расходы воды и цемента на 1 м^3 бетонной смеси, кг; m – весовое соотношение между заполнителем и цементом.

В соответствии с рекомендациями Европейского комитета по бетону [21] усадка может быть определена из выражения

$$\varepsilon_y \cdot 10^6 = \omega K U_{кр} = 300 \cdot \left(0,7 + 0,15 \left(\frac{C - 225}{25} + \frac{B/C - 0,4}{0,1} \right) \right), \quad (1.6)$$

где $U_{кр}$ – избыточная критическая влажность бетона определенного состава; K – коэффициент, учитывающий влияние состава бетона на величину $U_{кр}$; ω – коэффициент линейной усадки, практически не зависящий от состава бетонной смеси и принимаемый равным 3-10 мм/мм.

Рекомендуемое значение коэффициента $\omega = 3 \cdot 10^{-2}$ мм/мм справедливо при изменении градиента влажности только в направлении продольной оси. При условиях всестороннего высыхания $\omega = 1,5 \cdot 10^{-2}$ мм/мм.

По данным С.В. Александровского, величина усадочных деформаций ε_y в зависимости от В/Ц-отношения и расхода цемента C описывается выражением

$$\varepsilon_y \cdot 10^6 = 0,25 \cdot ((C+275)+6,9(C-75) \cdot (B/C)^2). \quad (1.7)$$

Данные С.В. Александровского использованы в рекомендациях СНиП, в соответствии с которым при расчете конструкций усадка учитывается коэффициентом K , величина которого принимается в зависимости от проектной марки бетона.

В соответствии с рекомендациями Г.В. Несветаева [83] влияние В/Ц-отношения на величину усадочных деформаций целесообразно учитывать, вводя коэффициент $K_{В/Ц}$, значение которого может быть принято за 1 при $B/C = 0,4$. С изменениями В/Ц-отношения коэффициент $K_{В/Ц}$ описывается линейной зависимостью вида

$$K_{В/Ц} = 1,98B/C + 0,18. \quad (1.8)$$

Сопоставляя предложенные зависимости, можно констатировать, что они отражают одно и то же принципиальное положение, заключающееся в том, что суммарное влияние технологических факторов на усадку бетона практически однозначно можно выразить через один параметр – расход воды B , независимо от дозировки остальных составляющих бетонной смеси. Так, например, в Норвежских нормах NS 3473 с увеличением водосодержания смеси свыше 155-175 кг/м³ (указанное водосодержание принято за базовое значение) величина усадки повышается на 25 %.

По данным Е.Н. Щербакова, зависимость усадочных деформаций бетона от расхода воды может быть описана уравнением

$$\varepsilon_{SH}^B = \alpha B^{3/2}, \quad (1.9)$$

где α – коэффициент, зависящий от расхода цемента, воды и активности цемента.

Величина α , по данным Е.Н. Щербакова [132], составляет 1,09, а по данным Г.В. Несветаева [83], – 1,114, т.е. различие в абсолютной величине α достигает не более 3 %.

Упрощая зависимость (1.9), Е.Н. Щербаков предлагает деформации усадки бетона нормировать только с учетом подвижности бетонной смеси. По его данным, деформации усадки бетонов из равноподвижных смесей повышаются по мере роста В/Ц-отношений, имея тенденцию к затуханию с увеличением этого отношения [131, 132].

Деформации усадки, характеризуемые низкими В/Ц-отношениями, находятся в прямой зависимости от жесткости бетонных смесей [161-163]. Весьма убедительны опыты по получению более тощих бетонных смесей при использовании крупного заполнителя с меньшим содержанием цемента и значительно меньшими деформациями усадки [3, 127].

Вместе с тем результаты большинства исследователей [118, 137, 146] позволяют все же считать, что усадка тяжелых бетонов в большей степени зависит от влагофизических свойств бетона. В связи с этим С.В. Александровский [5] предлагает более обобщенную зависимость усадки бетона:

$$\varepsilon_y = \varepsilon'_y \cdot \xi_1^y \cdot \xi_2^y \cdot \xi_3^y \cdot \xi_4^y, \quad (1.10)$$

где ε'_y – предельное значение деформаций усадки бетона из смеси определенного состава в некоторых заданных исходных условиях; $\xi_1^y \cdot \xi_2^y \cdot \xi_3^y \cdot \xi_4^y$ – безразмерные коэффициенты, учитывающие влагофизические свойства бетона.

На величину усадки бетона значительное влияние оказывают гранулометрический состав заполнителя и его модуль поверхности. В зависимости от модуля поверхности формируется размер цементной оболочки, обволакивающей зерна заполнителя [138, 139]. При усадке цементного камня в местах, где расстояния между зернами заполнителя и прилегающими к ним

поверхностными слоями цементного камня наименьшие, возникают тангенциальные растягивающиеся и сжимающиеся напряжения, уменьшающие его усадку. В то же время растягивающие напряжения способствуют образованию микротрещин в цементном камне и бетоне. Чем ближе расположены друг к другу зерна заполнителя, тем значительнее напряжения, меньше деформации усадки и больше вероятность появления микротрещин между смежными зернами [10].

При набухании же на участках наибольшего сдвижения зерен заполнителя возникают напряжения сжатия, которые уменьшают напряжения растяжения, вызванные усадкой, и способствуют закрытию трещин, образованных в результате усадки [10, 11].

Данные об усадке заполнителей бетона достаточно противоречивы. Например, по данным Н.П. Штейерта, усадка изменяется в пределах: 0,033-0,076 мм/м – для гранита и 0,029-0,065 мм/м – для известняка. По данным Генка и Шумана, значения деформаций усадки достигают: 0,1-0,26 мм/м – для гранита, 0,36-0,5 мм/м – для базальта, 0,13-0,15 мм/м – для известняка. Е.И. Лысенко приводит следующие показатели деформации усадки: 0,26 мм/м – гранита, 0,19 мм/м – песчаника, 0,51 мм/м – базальта и 0,13 мм/м – известняка [71, 130]. По данным А.Е. Шейкина величина усадки песчаника и кварца изменяется от 1,22 до 0,43 мм/м [126, 127].

Хотя сами каменные материалы, применяемые в качестве заполнителя, вследствие их пористости обладают способностью к усадке при высушивании [158], их влажностные деформации значительно меньше, чем деформации цементного камня. Так, например, по данным В.В. Стольникова, усадка каменных материалов составляет всего лишь 10 % от величины усадки цементного камня [144]. Заполнители, образуя жесткий каркас, оказывают сдерживающее влияние на деформации усадки бетона; сдерживающее действие заполнителя существенно зависит от его упругих свойств: оно тем сильнее, чем выше его модуль упругости. Это подтверждается многочисленными исследованиями усадки бетона одного и того же количественного состава, но с применением различных заполнителей [3]. Опираясь на известное теоретическое положение о преобладающей величине усадки цементного камня, многие исследователи описали усадку бетона в зависимости от объемной концентрации заполнителя и цементного камня в единице объема бетона и их качественных показателей. По данным Р. Лермита, соотношение усадки цементного камня к усадке бетона может быть описано уравнением

$$\frac{\varepsilon_y^{\text{ЦК}}}{\varepsilon_y^{\text{Б}}} = 1 + \frac{\beta V_3}{V_{\text{ЦК}}}, \quad (1.11)$$

где V_3 – объем заполнителя; $V_{\text{ЦК}}$ – объем цементного камня; β – коэффициент, равный 1,5–3,1.

По данным Ю.М. Баженова, величина β в формуле Р. Лермита может достигать 2,4–3,1.

Изменение усадочных деформаций бетона ε_y^B в зависимости от концентрации заполнителя Р. Левис описывает более упрощенной формулой [83]:

$$\varepsilon_y^B = \varepsilon_y^{\text{ЦК}} \cdot \exp(-2V_3), \quad (1.12)$$

где $\varepsilon_y^{\text{ЦК}}$ – усадка цементного камня; V_3 – объем заполнителя.

Уточняя формулу Р. Левиса, Г.С. Славчева предлагает свое математическое описание усадки бетона в зависимости от усадки цементного камня и содержания в нем заполнителя [113]:

$$\varepsilon_y^B = \varepsilon_y^{\text{ЦК}} \cdot \exp(-1,88 \cdot V_3). \quad (1.13)$$

Намного позднее Г. Пикетом [42] была предложена зависимость усадочных деформаций от концентрации заполнителя следующего вида:

$$\varepsilon_y^B = \varepsilon_y^{\text{ЦК}} \cdot \exp(1-2 \cdot V_3)^\alpha. \quad (1.14)$$

По данным А.Е. Шейкина [126], величина α должна находиться в пределах 1,2–1,7.

Обобщённое влияние различных технологических факторов – вида цемента и его активности, объемного содержания и качества заполнителя, В/Ц-отношения – на усадку бетона Г.В. Несветаев предложил учитывать в функциональной зависимости следующего вида:

$$\varepsilon_y^B = \int (В/Ц) \int (R_{\text{Ц}}) \int (V_c) \int (A) \varepsilon_y^{\text{ЦК}}. \quad (1.15)$$

Для практического применения Г.В. Несветаевым было предложено упрощенное выражение определения усадки бетона в зависимости от рецептурных факторов вида:

$$\varepsilon_y^B = \alpha \varepsilon_y^{\text{ЦК}}, \quad (1.16)$$

где α – коэффициент, учитывающий расход цемента и его активность, а также содержание воды.

Выражение (1.16) более совершенно для прогнозирования величины усадочных деформаций в производственных условиях.

Несмотря на обилие экспериментальных данных об усадке тяжелых бетонов, взаимосвязь ее величины с прочностными показателями бетона изучена мало. Отсутствуют зависимости, показывающие, каким образом повышение прочностных характеристик сказывается на собственной деформативной способности тяжелого бетона.

В отличие от весьма распространенного мнения о повышении усадки с увеличением схода цемента существуют и противоположные суждения

[140]. Так, например, по мнению С.В. Александровского, усадка более прочных бетонов ниже за счет большего сопротивления кристаллического сростка объемным изменениям геля, меньшей пористости и, следовательно, меньшей интенсивности влагообмена между бетоном и окружающей средой [5].

Данные о количественном соотношении величины усадки бетона и величины его марочной прочности весьма немногочисленны. В соответствии с рекомендациями СНиП усадка бетона заметно снижается с ростом марки бетона, в то же время Кинг и Иванс [61, 143], а также комиссия ФИП [21] отмечают возрастание величины усадочных деформаций.

Отмеченные закономерности имеют принципиальное значение при прогнозировании свойств усадки высокопрочных бетонов (марки 600 и выше), усадка таких бетонов изучена мало и поэтому требует уточнения.

Поскольку повышение расхода цемента при низких В/Ц-отношениях и соответствующей интенсивности уплотнения способствует снижению пористости бетона и повышению его плотности и прочности, то очевидно, что высокопрочные бетоны должны обладать меньшей усадкой.

1.5. Влияние эффективных суперпластификаторов, наполнителей и микроармирующих добавок на усадку и усадочную трещиностойкость высокопрочного бетона

Так как снижение суммарных усадочных деформаций бетона достигается в основном за счет пониженного водосодержания и уменьшения влажностной составляющей усадки, то понижение водосодержащих бетонных смесей до уровня нормальной густоты цементного теста (в частности, для получения бетонов высокой прочности) требует применения высокоэффективных разжижителей. Не случайно основные области применения суперпластификаторов – это высокопрочные бетоны (по американским понятиям, бетоны прочностью на сжатие выше 40 МПа, а по классификации нового Евростандарта EN 206 – 60 МПа). В связи с этим при производстве высокопрочных бетонов за рубежом предъявляются особо жесткие требования к суперпластификаторам, которые должны обладать не только высокой реологической активностью, но и минимальным воздействием на формирование структуры бетонов и физико-механические показатели в процессе эксплуатации [34]. На сегодня в отечественной практике используется не более 5 наиболее эффективных суперпластификаторов, таких, как С-3, 10-03, 40-03, СМД, СМФ, введение которых в бетонную смесь приводит к уменьшению расхода воды на 7-12 %, а цемента – на 5-7 % [14, 15-18, 29]. Наибольший эффект дает сухой суперпластификатор на основе продуктов конденсации нафтаменсульфокислоты и формальдегида, вводимый при совместном помоле с портландцементом [14, 18, 57].

Усадка высокопрочного бетона с применением СП С-3 заметно отличается от усадки бетона рядовых марок, однако эти данные малочисленны и достаточно противоречивы, поэтому требуют дальнейшего изучения. Так, усадочные деформации бетона с С-3, по данным А.М. Краснова, составляют 0,198 мм/м по сравнению с контрольным бетоном, а по данным С.С. Каприелова, достигают $68,8 \cdot 10^{-5}$ мм/м [63].

Таким же разжижающим действием, как и С-3, обладает суперпластификатор СМФ. Наличие добавки СМФ в составе цементного камня и бетона способствует снижению усадочных деформаций. Так, по данным [17, 123], усадка образцов с добавкой СМФ и С-3 составляет соответственно $32,5 \cdot 10^{-5}$ мм/м и $37,7 \cdot 10^{-5}$ мм/м, а образцов контрольного состава (без добавки) достигает $38,9 \cdot 10^{-5}$ мм/м.

Применение комплексных многокомпонентных добавок позволяет увеличить эффективность их действия и во многих случаях избежать негативных последствий, присущих индивидуальным компонентам. Основные составляющие таких добавок – суперпластификатор С-3 в сочетании с другими химическими модификаторами [29, 54].

В соответствии с широко признанным суждением о приоритете комплексных добавок над индивидуальными представляется целесообразным использование С-3 в комплексе с TiO_2 + ОРД-7 в соотношении 0,75:0,25. Усадка бетона при таком комплексе составила 0,26 мм/м, в то время как бетон контрольного состава имел усадку 0,67 мм/м. Усадка бетона с добавкой TiO_2 и С-3 в соотношении 0,45:0,25 достигала 0,37 мм/м, а усадка непластифицированного бетона (без С-3) – 0,5 мм/м [54].

Перспективным является применение полифункциональных модификаторов (ПМФ) в виде эмульсий, суспензий, а также в виде сухого порошка [51]. При этом отпадает необходимость в отдельном хранении и дозировании компонентов ПМФ, что существенно упрощает технологию приготовления бетонной смеси.

К сожалению, ГОСТ 24211-91 «Добавки для бетонов. Общие технические требования» не конкретизирует виды добавок, влияющих на объемные изменения цементного камня и бетона. Как известно, в соответствии с ГОСТ 24211-91 все добавки подразделяются на: пластифицирующие, стабилизирующие, водоудерживающие, регулирующие сохраняемость бетонной смеси, регулирующие твердение бетона, повышающие прочность и коррозионную стойкость, морозостойкость бетона и др.

Вместе с тем в последнее десятилетие, особенно в связи с развитием производства сухих строительных смесей, разработан ряд эффективных зарубежных функциональных добавок, в том числе пластифицирующих и снижающих усадочные деформации. К ним относятся порошковый пластификатор FEBMIX, выпускаемый фирмой «FEB Ltd Swinston (Швеция), Перамин FP SMF-10 фирмы Suanchesten (Великобритания), антиусадочная добавка грамин SPA фирмы «Pertstorp» (Швеция), малоусадочный ком-

понент MELFLUX 1641 F фирмы «SKW Polymers» (Германия), а также различные редиспергируемые сополимерные порошки MOWILITH PULVER, известные под торговой фирмой «ЕвроХим-1» [96, 97].

Перамин SPA – антиусадочная добавка, снижающая усадку как на стадии пластической деформации, так и на стадии затвердевания. Кроме того, цементный камень с добавкой SPA, затвердевая, не расширяется в объеме, а, реагируя на химическом уровне, изменяет механизм усадочной реакции. За счет использования Перамина SPA достигается снижение усадки до 50 % как в начальной стадии, так и по истечении 28 суток. При этом заметно создается вероятность растрескивания материала [96].

Германский СП ВЕТОСРЕТЕ не только способствует повышению прочности, но практически исключает карбонизацию цементного камня и повышает его стойкость в агрессивных средах [1].

Германский СП MELFLUX 1641 F является не только высокоэффективным гиперпластификатором, разжижителем, но и противоусадочной добавкой [97].

Обобщая литературные данные, можно констатировать, что снижение усадочных деформаций бетона в основном обеспечивается посредством водоредуцирования за счет использования различных видов суперпластификаторов. Водоредуцирующая эффективность суперпластификаторов может быть увеличена за счет различной процедуры их введения или сочетания с тонкомолотыми минеральными наполнителями различной природы.

Широкое применение получили органоминеральные добавки в виде комплекса суперпластификатора и микронаполнителя, обладающие конкретным модифицирующим эффектом. Например, МБ-01 в виде комплекса суперпластификатора С-3 и микрокремнезема или комплекс МБ-С, включающий С-3, микрокремнезем, золу-унос [53-56, 58].

По данным В.Г. Батракова, усадка бетона с микрокремнеземом, вводимым в бетон в количестве 116 кг/м³, в 5 раз меньше, чем усадка бетона контрольного состава, без микрокремнезема. С увеличением микрокремнезема до 142 кг/м³ усадочные деформации не возрастают [15].

По данным С.С. Каприелова [57], введение добавки МБ-01 значительно снижает усадку бетона, повышает усадочную трещиностойкость и способствует увеличению долговечности в агрессивных средах. Основываясь на данных Ф.А. Иссерса [48], констатируем, что усадка высокопрочного бетона с добавкой МБ 10-01 в 2 и 2,5 раза ниже по сравнению с «нормируемыми величинами усадки» [15, 16, 57]. Модификатор МБ 10-01 существенно снижает деформации влажностной усадки. Так, усадка бетона с МБ 10-01 составила $16,5 \cdot 10^{-5}$ мм/м, что на 36% ниже по сравнению с усадкой контрольного состава, достигающей $22,5 \cdot 10^{-5}$ мм/м [48].

Данные, полученные А.Г. Ольгинским [88], свидетельствуют о том, что тонкодисперсные пылевидные наполнители (гранит, песчаник, известняк)

понижают усадку бетона в среднем на 15-25 %. Объясняется это более плотной структурой цементных бетонов с наполнителем.

Вместе с тем, по данным Е.Г. Величко [26], микронаполнители в виде золы способствуют увеличению усадки бетона на 13 % по сравнению с контрольным составом. Объясняется это высокой пористостью, изменениями между кристаллическим сростком и гелиевой составляющей в структуре цементного камня. В то же время применение в качестве наполнителя шлака уменьшает усадку на 40 % по сравнению с бетоном без наполнителя [16, 24, 26, 53].

По зарубежным данным [145], значения усадочных деформаций бетона, приготовленного с добавкой молотого доменного шлака, близки величинам усадки обычного бетона, без добавки.

По данным В.В. Попова, замена 10-15 % шлаковой пемзы более легким гранулированным шлаком привела к увеличению усадки на 15-17 % [94].

Выполненное Е.Е. Хахуташвили сравнение деформаций усадки мелкозернистого и крупнозернистого бетонов, изготовленных на вулканическом шлаке, показало, что усадка мелкозернистого бетона значительно меньше, чем усадка крупнозернистого бетона [119].

Широкое применение бетона в сочетании со стеклом при строительстве многих зданий в США привело к значительному накоплению стеклоотходов. В частности, только в Нью-Йорке их ежегодное количество превышает 100 тыс. т. В настоящее время стеклоотходы в США используют в основном в качестве засыпки и заполнителя для битума в дорожном строительстве [13]. Вместе с тем выполнена попытка использования стеклянного боя в качестве наполнителя при производстве стеновых панелей [13]. При этом установлено, что усадка бетона без наполнителя составила 0,017 мм/м, а усадка бетона с заменой цемента стеклом достигала 0,029 мм/м. Полученные показатели усадки значительно ниже величины нормативной усадки ($\epsilon = 0,065$ мм/м), указанной в стандарте США FSTM C 90 [13]. По данным [98], особо тяжелые высокопрочные бетоны, изготовленные с комплексным использованием отходов стекла в качестве заполнителя, стеклонеполнителя и стеклосителя с СП, имеют чрезвычайно низкую усадку, не превышающую 0,15 мм/м, что находится на одинаковом уровне с бетонами на ВНВ. Полная усадка таких бетонов в жестких условиях сушки при 105°C до удаления всей адсорбционно-связанной воды не превышает 0,3 мм/м, что определяет этот вид бетона как малоусадочный и имеющий высокую трещиностойкость.

Зарубежные данные [49, 106] свидетельствуют о незначительной усадке бетона, пропитанного нефтепродуктами. Это обусловлено тем, что гелевая структурная составляющая цементного камня и бетона блокирована гидрофобными пленками и вследствие этого лишена влагообмена с внешней средой.

Для получения малоусадочных бетонов и бетонов с компенсированной усадкой особое место занимают расширяющие добавки, введение которых при твердении портландцемента приводит к увеличению линейных размеров, что позволяет обеспечить высокую трещиностойкость и долговечность конструкций. Благодаря этому бетон с расширяющими добавками нивелирует большие усадочные деформации [43, 45]. Введение расширяющей добавки непосредственно в процессе приготовления бетонной смеси регулирует энергию расширения вяжущего, что позволяет получать как бетоны с компенсированной усадкой, так и напрягающие бетоны с различной энергией самонапряжения, обеспечивая при этом высокое качество изделий.

На основе анализа зарубежной и отечественной информации можно условно подразделить расширяющие добавки на три группы: алюминатно-сульфатные, алюминатно-оксидные и оксидные [45]. Расширение цементов, содержащих алюминатно-сульфатные добавки, происходит в результате взаимодействия алюмо- и сульфосодержащих фаз с образованием этtringита. В добавках второй группы наряду с алюмосульфатными оксидами присутствует и свободный оксид кальция, поэтому расширение осуществляется как за счет выделения этtringита, так и в результате гидратации свободного оксида кальция.

В цементах с добавками третьей группы расширение происходит в результате гидратации оксидов кальция, магния и др. [43].

При твердении бетона с компенсированной усадкой присутствуют деформации двух видов: с одной стороны, усадочные деформации, с другой - деформации расширения за счет увеличения объема твердой фазы при образовании этtringита. В результате этих процессов бетоны с компенсированной садкой получили деформации расширения. Дальнейшее проявление усадочных деформаций у бетонов с компенсированной усадкой компенсирует объемные деформации, полученные после тепловлажностной обработки.

Эффективным технологическим приемом снижения усадки и усадочной трещиностойкости является использование армирующих элементов. В качестве таковых применяются стальные, минеральные, углеродные и другие волокна. Целесообразность дисперсного армирования диктуется фрактальной иерархией процесса трещинообразования и присутствием в материале трещин от субмикро- до макромасштабного размера. На сегодня широкое распространение получило многоуровневое армирование, где армирующими элементами на макромасштабном уровне являются волокна, а на микромасштабном (уровне цементного микробетона) – вводимые в формовочную смесь совместно с цементом высокодисперсные минеральные наполнители [36, 37, 39].

Многоуровневое дисперсное армирование происходит из гипотезы о конгруэнтности армирующих элементов «блокируемым» трещинам соот-

ветствующего уровня структуры – цементирующего вещества (новообразований), цементного микробетона, мелкозернистого бетона [125].

Наиболее эффективными, по мнению Е.М. Чернышова, для армирования материала на уровне цементирующего вещества могут являться предварительно выращенные игольчатые кристаллы гипса, этtringита, гидросиликаты кальция, которые имеют нитевидный габитус и характеризуются высокими значениями прочности на сжатие, высокой коррозионной стойкостью. Однако значительным недостатком армирования, осуществляемого путем введения в исходные смеси указанных кристаллов, является сложность их получения и возможность механического повреждения армирующего материала в процессе приготовления формовочной смеси. Поэтому на уровне цементирующего сродства для армирования следует применять кристаллы этtringита, выращиваемые непосредственно при гидратации цемента, в результате чего реализуется явление самоармирования [62, 66, 116, 124].

Армирование материала на уровне цементного микробетона, с учетом присущих ему микротрещин, целесообразно осуществлять волокнами длиной 1-5 мм и диаметром 10-50 мкм [101, 149]. В данном случае пригодными могут быть различные виды стекловолокна, асбестовые и другие минеральные волокна. На практике предпочтение отдают асбестовому волокну, как армирующему материалу, что обусловлено высокой степенью его сродства к новообразованиям, возникающим при твердении портландцемента, высокой прочностью и модулем деформативности [22]. Армирование бетона минеральными углеродными, асбестовыми и базальтовыми волокнами всесторонне рассмотрено в работах отечественных и зарубежных ученых [25, 100, 116, 120, 125, 149], в которых отмечены высокие показатели прочности на сжатие и растяжение, высокие деформативные показатели армированного фибробетона. Однако, в отличие от прочностных и деформативных показателей, данных по усадочным деформациям, как и по усадочной трещиностойкости дисперсно-армированного бетона, в литературных источниках не обнаружено [76, 77, 78, 111, 136, 154].

2. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Интерес к практическому использованию дисперсных наполнителей в цементных бетонах, а также к исследованиям различных аспектов их применения и механизмов их действия не снижается вот уже более 50 лет. Однако лишь в последние годы эти исследования были направлены на поиски дисперсных наполнителей с высокой реакционно-химической активностью по отношению к продуктам гидратации цемента, в частности к гидролизной извести. При этом высокая химическая активность и скорость реакции предопределялись не только термодинамикой протекания реакции взаимодействия компонентов, но и чрезвычайно малыми размерами амортизированных частиц наполнителя (0,5-2,0 мкм).

Для промышленных целей ультрадисперсные наполнители (УДМН) с высокой поверхностной активностью могут быть получены различными способами: конденсацией, пылеосаждением твердых частиц из отходящих газов, конденсацией при испарении сплавов, помолом минеральных пород с сепарацией и отделением мелких фракций. Известно использование в качестве тонкомолотого наполнителя молотого туфа, мела, известняка, доломита, аглопорита, опоки, золы, шлака, кварцевого песка и других минеральных пород и техногенных отходов.

Широкое распространение как в зарубежной, так и в отечественной практике производства высокопрочного бетона получило использование в качестве минерального наполнителя отходов от производства ферросилиция и ферросилихрома. Применение этих побочных продуктов, получивших название «микрокремнезем» («microsilica») или «силикатный дым» («silica fume»), и дегидратированных каолинов, обладающих способностью к пуццоланическому связыванию портландита, позволило достигнуть высоких результатов в технологии обычного и высокопрочного бетонов повышенной долговечности. По химическому составу указанные кремнеземы на 70-90 % состоят из аморфного кремнезема, способного связывать гидролизную известь в процессе твердения цемента в низкоосновные гидросиликаты кальция.

Значительное число исследований в этой области посвящено поиску новых видов наполнителей и способов их получения, в том числе с использованием вторичных и техногенных отходов. Продолжаются дискуссии [29, 32, 48, 56, 149] по одному из основных вопросов – механизму повышения прочности цементного камня с дисперсными наполнителями. Признается возможным как химический, так и физический механизм. Считается, что в результате действия активных центров процессы кристаллизации в цементном камне в зонах контакта с дисперсным наполнителем протекают в особых условиях:

- ✓ ускоряется зарождение кристаллических новообразований, увеличивается их количество, повышается степень кристаллизации;
- ✓ проявляется избирательность при эпитаксиальном наращивании новообразований на поверхность частиц наполнителя;
- ✓ кристаллы новой фазы имеют определенную ориентированность относительно поверхности частиц наполнителя, имеющих различные габитусы кристаллов.

Используемые для высокопрочных бетонов микрокремнезем (МК) и золы имеют чрезвычайно высокую дисперсность. В связи с этим следует выделить особенность влияния ультрадисперсных микронаполнителей на основе техногенных отходов на процессы структурообразования цементного камня и высокопрочного бетона, объемные изменения и трещиностойкость в процессе эксплуатационного воздействия. При этом важно приблизить дисперсность наполнителей к дисперсности микрокремнезема.

В то же время мало изучены комбинации пуццоланических высокодисперсных добавок с кристаллическими затравками (центры кристаллизации силикатных фаз алита и белита), содержащими гидросиликаты кальция.

Для получения порошков узкого гранулометрического состава сконструирован и изготовлен аэродинамический трубчатый сепаратор. Принцип действия трубчатого сепаратора основан на оседании частиц наполнителя в ламинарном воздушном потоке по длине трубы. Схема установки представлена на рис. 2.1.

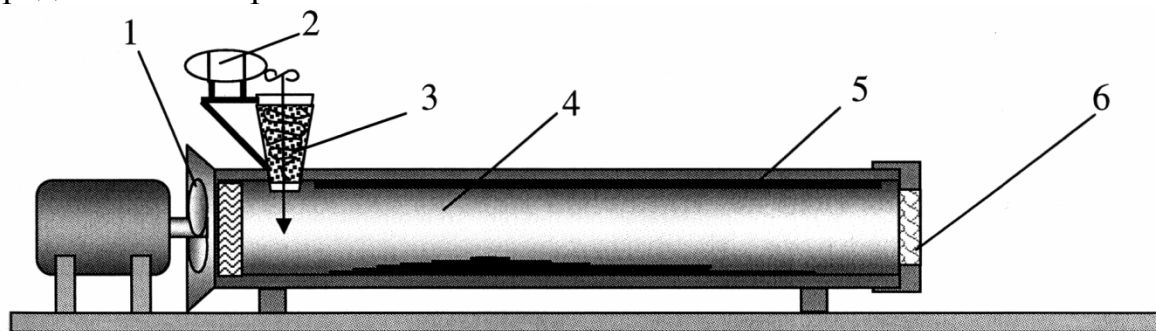


Рис. 2.1. Схема установки для фракционирования порошковых материалов:
 1 – вентилятор, 2 – электродвигатель с питанием; 3 – бункер с порошком,
 4 – трубчатый сепаратор, 5 – извлекаемая прокладка для сбора порошка; 6 – фильтр

Максимальная скорость V_{\max} движения воздуха по длине трубы для обеспечения ламинарного режима рассчитывалась исходя из критерия Рейнольдса:

$$V_{\max} = \frac{Re \cdot \nu}{d}, \quad (2.1)$$

где ν – кинематическая вязкость; d – диаметр трубы; Re – число Рейнольдса (для ламинарного потока $Re < 1000$).

Для трубы диаметром 100 мм скорость воздушного потока исходя из этого условия не должна превышать 0,23 м/с.

Оседание частиц в воздухе подчиняется закону Стокса, согласно которому:

$$v = \frac{2(\rho - \rho') \cdot r^2}{9\eta}, \quad (2.2)$$

где ρ – плотность частиц; ρ' – плотность воздуха; η – кинематическая вязкость; r – радиус частиц.

С помощью разработанной установки производилось распыление предварительно измельченных в лабораторной шаровой мельнице автоклавированных отходов от срезки «горбуши» газобетона и «боя» силикатного кирпича до удельной поверхности $S_{уд} = 300-400 \text{ м}^2/\text{кг}$. Из промышленных тонкодисперсных наполнителей распылению подвергался перлит Мытищинского комбината «Стройперлит».

В результате такого распыления были выделены ультрадисперсные наполнители с удельной поверхностью: не менее $1343 \text{ м}^2/\text{кг}$ – для отхода от срезки «горбуши» газобетона, $1025 \text{ м}^2/\text{кг}$ – для «боя» силикатного кирпича и $1012 \text{ м}^2/\text{кг}$ – для перлита, при их плотности 2,1; 2,55; 1,79 $\text{кг}/\text{м}^3$ соответственно [52].

Дисперсность полученных таким образом ультрадисперсных наполнителей оценивалась по величине удельной поверхности, определяемой на приборе ПСХ-2 конструкции ВНИИНИСМ.

Результаты гранулометрического анализа состава дисперсных наполнителей и их распределения по длине трубы приведены на рис. 2.2, 2.3, 2.4.

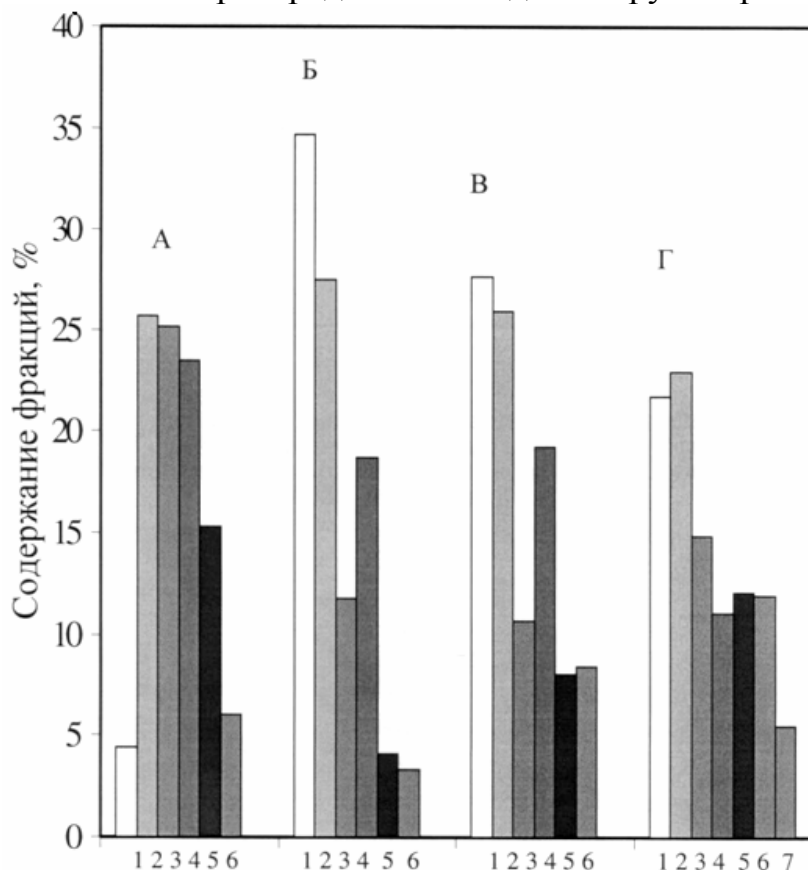


Рис. 2.2. Результат гранулометрического анализа дисперсных наполнителей:
 А – отход газобетона на с $S = 413 \text{ м}^2/\text{кг}$;
 Б – микрокремнезем с $S = 896 \text{ м}^2/\text{кг}$;
 В – силикатный кирпич с $S = 405 \text{ м}^2/\text{кг}$;
 Г – отход газобетона с $S = 800 \text{ м}^2/\text{кг}$;
 1 – диаметр частиц наполнителей 0-4 мкм;
 2 – то же 4-8 мкм; 3 – то же 8-12 мкм;
 4 – то же 12-16 мкм;
 5 – то же 16-20 мкм;
 6 – то же 20-24 мкм;
 7 – то же 24-28 мкм

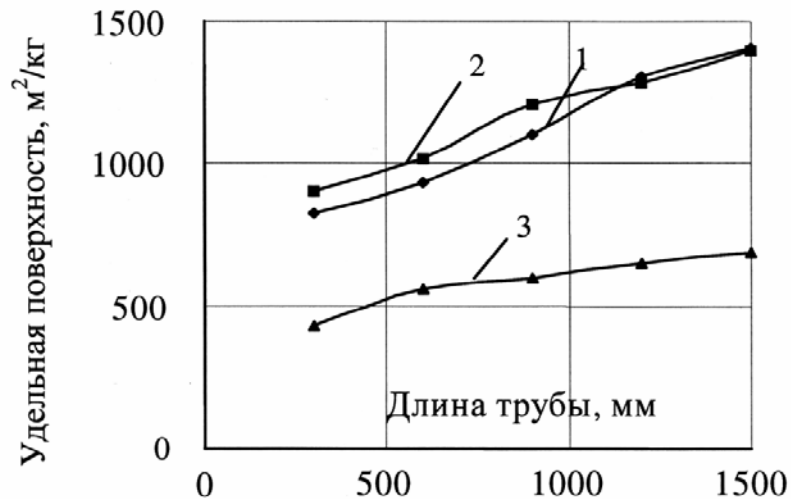


Рис. 2.3. Распределение частиц наполнителя с различной дисперсностью по длине трубы:
 1 – перлит; 2 – отход от срезки «горбуши» газобетона;
 3 – «бой» силикатного кирпича

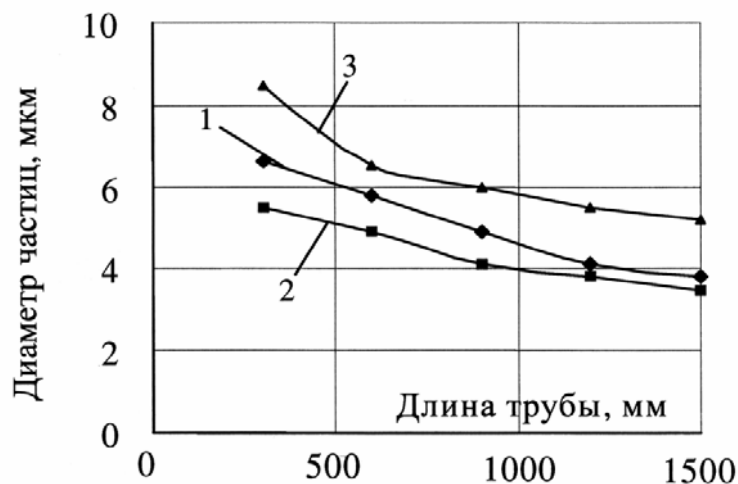


Рис.2.4. Распределение частиц наполнителя различного диаметра по длине трубы:
 1 – перлит; 2 – отход от срезки «горбуши» газобетона;
 3 – «бой» силикатного кирпича

Как видно из рис. 2.2, гранулометрический состав микрокремнезема представлен в основном фракциями 0-8 мкм, суммарное содержание которых составило 63 %. «Бой» молотого силикатного кирпича, а также вторая партия отхода от срезки «горбуши» газобетона имели идентичную с микрокремнеземом картину распределения фракционного состава. В то же время, в отличие от микрокремнезема, фракционный состав промышленных отходов характеризовался более высоким содержанием крупных частиц размером 16-20 и 20-24 мкм. Их суммарное количество в силикатном кирпиче достигало 15 %, а в газобетоне – 25 %. Зерновой состав первой партии газобетона характеризовался низким содержанием фракции 0-4 мкм (менее 5 %).

3. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ГИДРАТАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

3.1. Оценка влияния ультрадисперсных минеральных наполнителей на водопотребность цементных суспензий

В качестве пластифицирующей добавки при проведении экспериментальной части работы был использован отечественный суперпластификатор (СП) С-3. Суперпластификатор С-3 – разжижитель бетонных смесей, добавка на основе натриевой соли продукта конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида, выпускаемый Новомосковским заводом органического синтеза в соответствии с ТУ 6-36-020429-625, в виде водного раствора с концентрацией 30-35 %, а также в виде сухого порошка. Продукт не изменяет своих свойств при нагревании и замораживании до температуры -40 °С. рН среды составляет 4-6. Из группы СП на меламиновой основе использовался суперпластификатор – Peramin FP SMF-10 – высокоэффективный суперпластификатор, представляющий собой белый порошок сульфата меланина, конденсированного формальдегидом. Peramin FP не содержит хлорид-ионов и совместим с другими продуктами из группы пераминов. В табл. 3.1 представлены основные свойства этого суперпластификатора.

Т а б л и ц а 3.1

Свойства суперпластификатора SMF-10

Свойства	Показатели	Метод оценки
Относительная плотность при 20 °С	1,21 кг/дм ³ ±10 г/дм ³	ISO 758
Твердое содержание	35 %±1 %	BS-EN 480-8
Эквивалент Na ₂ O	5 %	BS-EN 480-12
Содержание хлорида	0,05 %	BS-EN 480-10
Значение рН	10,5±1,0	ISO 4316
Активные компоненты	Олигомер на основе меланина	-
Цвет	Прозрачный	-
Точка замерзания	0 °С	-
Побочный эффект введения	Нет	-
Побочный эффект передозировки	Замедление схватывания	-

На первом этапе исследований была выполнена оценка влияния высокодисперсных наполнителей на водопотребность и реологические свойства пластифицированных и непластифицированных цементных суспензий (табл. 3.2).

Пластифицирующий эффект и водоредуцирующее действие оценивались по экспресс-методике, разработанной на кафедре ТБКиВ Пензенского ГУАС. Эта методика позволяет существенно сократить расход материалов и улучшить условия проведения эксперимента. Для определения пластифицирующего эффекта использовали видоизмененный вискозиметр Суттарда, который представляет собой стальной цилиндр из нержавеющей стали с внутренним диаметром 10 мм и высотой 40 мм.

Изменение водопотребности и подвижности оценивалось по величине расплыва на границе начала гравитационной растекаемости. Предельное напряжение сдвига при этом определялось по формуле

$$\tau_0 = \frac{hd^2\rho}{kD^2}, \quad (3.1)$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига суспензии, Па; h и d – соответственно высота и диаметр вискозиметра, м; ρ – плотность суспензии, кг/м³; D – диаметр расплыва суспензии, м; k – коэффициент, учитывающий перераспределение напряжений в вязкопластических телах и равный 2.

Для вискозиметра с указанными размерами расплыв на границе гравитационной растекаемости равен 22×24 мм, что соответствует $\tau_0 = 10-30$ Па.

Т а б л и ц а 3.2

Реологические свойства цементных суспензий.

№ п/п	Состав цементный суспензий, %			В/Т	Расплав, мм	В _д , %
	Цемент	УДМН	С-3			
1	2	3	4	5	6	7
1	100	-	-	0,41	22×24	
2	100	-	1,0	0,20	23×24	51,2
3		«Бой» силикатного кирпича ($S_{уд} = 405$ м ² /кг) - 100		0,34	22×24	17,0
4	-	«Бой» силикатного кирпича ($S_{уд} = 1025$ м ² /кг) - 100	-	0,36	24×24	12,2
5	-	Отход от срезки «горбуши» газобетона ($S_{уд} = 413$ м ² /кг) - 100	-	0,43	23×22	-
6	-	Отход от срезки «горбуши» газобетона ($S_{уд} = 1343$ м ² /кг) - 100	-	0,48	23×24	-

Окончание табл. 3.2

1	2	3	4	5	6	7
7	67	«Бой» силикатного кирпича ($S_{уд}=405 \text{ м}^2/\text{кг}$) - 33	–	0,35	22×23	14,6
8	67	«Бой» силикатного кирпича ($S_{уд}=1025 \text{ м}^2/\text{кг}$) - 33	–	0,36	23×23	12,2
9	67	«Бой» силикатного кирпича ($S_{уд}=405 \text{ м}^2/\text{кг}$) - 33	1,0	0,18	22×23	56,1
10	67	«Бой» силикатного кирпича ($S_{уд}=1025 \text{ м}^2/\text{кг}$) - 33	1,0	0,17	23×24	58,5
11	67	Отход от срезки «горбуши» газобетона ($S_{уд}=413 \text{ м}^2/\text{кг}$) - 33	–	0,38	23×24	7,3
12	67	Отход от срезки «горбуши» газобетона ($S_{уд}=1343 \text{ м}^2/\text{кг}$) - 33	–	0,39	24×24	4,9
13	67	Отход от срезки «горбуши» газобетона ($S_{уд}=413 \text{ м}^2/\text{кг}$) - 33	1,0	0,26	23×24	36,6
14	67	Отход от срезки «горбуши» газобетона ($S_{уд}=1343 \text{ м}^2/\text{кг}$) - 33	1,0	0,25	22×23	39,0
15	67	Перлит ($S_{уд}=800 \text{ м}^2/\text{кг}$)-33	–	0,70	24×23	–
16	67	Перлит ($S_{уд}=800 \text{ м}^2/\text{кг}$)-33	1,0	0,50	23×24	–

Как следует из табл. 3.2, мономинеральные суспензии практически одинаковой текучести получены при В/Т-отношениях в пределах 0,34–0,50. Минимальная водопотребность В/Т=0,34–0,36 зафиксирована для водной дисперсии на основе «боя» силикатного кирпича, водотвердое отношение цементной суспензии при такой же текучести достигает В/Т=0,41. Значительной водопотребностью В/Т=0,7, превышающей водопотребность цементной суспензии, обладает перлит. Промежуточное положение занимает отход от срезки «горбуши» газобетона.

Для комплексной оценки суперпластификатора и дисперсности наполнителя изучено водоредуцирующее действие суперпластификатора, вводимого с ультрадисперсным микронаполнителем в пластифицированные и непластифицированные цементные суспензии. Добавка С-3 вводилась на дисперсных наполнителях (СДН). Для этого производился совместный помол суперпластификатора с исследуемыми наполнителями. В соответствии с принятым способом СДН дозировка С-3 составляла 1,0% от расхода смешанной суспензии. Содержание наполнителя принималось постоянным – не более

25 % от расхода цемента. Водоредуцирующее действие V_d определялось по снижению расхода воды в процентах от контрольного (см. табл. 3.2).

Введение добавки С-3 в количестве 1 % в контрольный состав, без микронаполнителя, способствует снижению В/Ц-отношения с 0,41 до 0,2, или на 51,2 %. Водосодержание цементных суспензий, модифицированных С-3 совместно с УДМН, различно. Водоредуцирующее действие суперпластификатора, вводимого совместно с силикатным кирпичом, составляет 56,1 %. С повышением дисперсности кирпича водопотребность цементной суспензии уменьшается, а водоредуцирующий индекс достигает своего максимального значения ($V_d=58,5$ %). При совместном введении кристаллической затравки силикатного кирпича и микрокремнезема БС-120 в соотношении 2:1 в количестве 12 % от массы цемента $V_d=57,5$ %. Добавка молотого газобетона повышает водопотребность как пластифицированной, так и непластифицированной цементной суспензии. С повышением дисперсности отхода газобетона водопотребность пластифицированных суспензий увеличивается с 36,6 до 39,0 %.

В целом, выполненные исследования свидетельствуют о значительном снижении водопотребности цементных суспензий, комплексно модифицированных суперпластификатором и ультрадисперсными автоклавированными микронаполнителями.

3.2 Процессы гидратации и формирование структуры цементного камня с ультрадисперсными микронаполнителями

На втором этапе исследования была выполнена оценка влияния ультрадисперсных микронаполнителей из автоклавированных отходов на процессы гидратации и кинетику набора прочности наполненных цементов. Для сравнения в качестве микронаполнителей были исследованы высокодисперсные микрокремнезем (БС-120) ПО «Сода» (г.Стерлитамак), микрокремнезем и перлит Челябинского металлургического комбината (табл. 3.3, 3.4).

Для исследования влияния наполнителей на гидратацию и твердение цемента определялись прочность в различные сроки твердения, а также количество гидролизной извести и степень гидратации цемента. Эксперимент проводился на составах при соотношении цемент : дисперсный наполнитель (Ц:ДН) = 80:20, изготовленных при В/Т = 0,26, что соответствовало тесту нормальной густоты. Исключение составили смеси, которые наполнены перлитом и микрокремнеземом (БС-120), для которых в связи с высокой водопотребностью наполнителей водотвердое отношение составляло: 0,6 – для перлита и 0,5 – для микрокремнезема.

Таблица 3.3

Физико-механические характеристики используемых цементов

Завод изготовитель	Марка цементов	$S_{уд}$, м ² /кг	НГ, %	Равномерность изменения объема	Сроки схватывания, ч-мин		Активность через 28 суток, МПа	
					начало	конец	при изгибе	при сжатии
ПО «Осколцемент»	ПЦ-500Д0	316	25,7	Выдержал	3-10	5-15	7,3	51,8
ПО «Сода» г. Стерлитамак	ПЦ-500Д0	290	26,2	Выдержал	2-50	4-00	7,0	50,5
ПО «Серебряковцемент»	ПЦ-500Д0	295	25,5	Выдержал	3-45	5-10	6,5	49,0

Таблица 3.4

Химический состав дисперсных наполнителей

Наименование наполнителя, завод-изготовитель	Содержание оксидов, %											
	C	Al ₂ O ₅	P ₂ O ₅	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	Хлориды	Сульфаты
Микрокремнезем Челябинского металлургического комбината	2,0-4,0	0,0004-0,001	0,08-0,25	80-90	—	0,38-0,75	1,0-2,3	1,3-1,8	2,8-8,0	—	—	—
Микрокремнезем ПО «Сода» г. Стерлитамак	—	—	—	89,8	0,6	0,1	0,17	0,8	0,8	—	1,00	0,2
Перлит Мытищинского комбината «Стройперлит»	—	—	6,4	73,13	—	11,7	1,08	0,55	0,3	1,71	—	—

Результаты определения свободного СаО представлены в табл. 3.5. Как следует из табл. 3.5, наименьшее количество свободной извести, образующейся при гидратации цемента, зафиксировано для цементной композиции, содержащей в своем составе микрокремнезем (БС-120), что подтверждает известное представление [15, 55] о химическом взаимодействии диоксида кремния, содержание которого в микрокремнеземах составляет 75-95 %, с Са(ОН)₂ с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция. По данным С.С. Каприелова и В.Г. Батракова, в высокопрочном бетоне с микрокремнеземом практически нет портландита, так как он весь связан в низкоосновные гидросиликаты кальция [56, 57].

Содержание СаО в возрасте 1 сут в композиции с микрокремнеземом на Стерлитамакском цементе составило 1,56 %, в возрасте 7 сут – 1,15 и 28 сут – 1,76%, что в 1,5-3 раза ниже содержания СаО в цементном композите контрольного состава, без наполнителей. Промежуточное положение занимают цементные композиции, наполненные техногенными продуктами боя силикатного кирпича, газобетона и перлита. Для них содержание СаО в возрасте 3 сут отличается от содержания СаО в контрольном составе незначительно и составляет 2,67; 2,53; 2,68 %, увеличиваясь к 28-суточному возрасту. Полученные результаты показывают, что цементный камень, модифицированный силикатным кирпичом, газобетоном, перлитом, по содержанию оксида кальция к 28-суточному возрасту наиболее приближен к цементному камню без наполнителя.

Т а б л и ц а 3.5

Кинетика изменения концентрации СаО в цементных композициях, модифицированных ультрадисперсным минеральным наполнителем

№ п/п	Наполнитель	S _{уд} , м ² /кг	В/Т	Количество свободного СаО, %		
				1 сут	3 сут	28 сут
1	–		0,26	1,96*	3,24	3,95
				2,01	3,55	4,10
	Микрокремнезем ПО «Сода»	2000	0,50	1,56	1,15	1,76
				1,61	1,30	1,87
3	«Бой» силикатного кирпича	731	0,26	1,99	2,67	3,14
				2,05	2,81	3,28
4	Отход от срезки «горбуши» газобетона	740	0,26	2,32	2,53	3,03
				2,40	2,62	3,10
5	Перлит	812	0,60	2,66	2,68	3,35
				2,80	2,98	3,68

П р и м е ч а н и е . В числителе – цемент ПО «Сода» (г. Стерлитамак), в знаменателе – цемент ПО «Осколцемент».

Выполнена оценка степени гидратации цемента, определяемая по количеству химически связанной воды, путем высушивания навески при температуре 105-110 °С и последующего прокаливания при температуре 900-1000 °С. Зависимость степени гидратации от времени представлена на рис. 3.1.

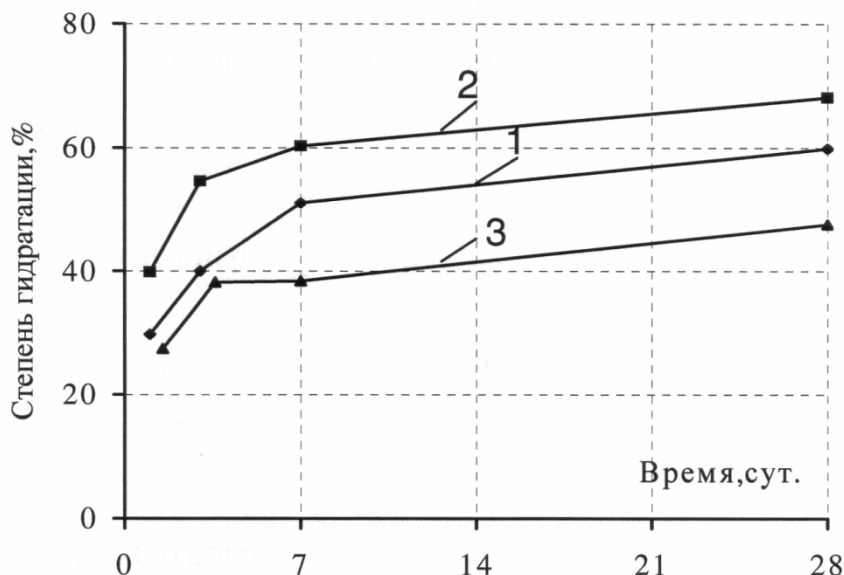


Рис. 3.1. Влияние вида ультрадисперсного минерального наполнителя на степень гидратации цемента:
 1 – контрольный, без добавки; 2 – с добавкой микрокремнезема БС-120;
 3 – то же с добавкой «боя» силикатного кирпича

Степень гидратации старооскольского цемента в первые сутки твердения очень высока (30,1 %) и быстро возрастает в последующие 6 суток, достигая к семисуточному возрасту 50,6 %, а затем сильно замедляется к 28 суткам твердения. Микрокремнезем (БС-120), поглощая свободную гидролизную известь и понижая ее содержание в жидкой фазе, ускоряет тем самым гидратацию цемента; возможно, такое ускорение связано не столько с поглощением извести, сколько с более высоким В/Т-отношением по сравнению с контрольным составом.

Выполнена оценка влияния ультрадисперсных минеральных наполнителей различной удельной поверхности на кинетику набора прочности цементного камня (табл. 3.6). Как следует из табл. 3.6, молотый газобетон, несмотря на более высокое содержание тоберморитоподобных гидросиликатов типа CSH (B), C₂SH и C₂SH (A) по сравнению с их количеством в силикатном кирпиче, заметно уступает последнему в формировании прочности. Это обусловлено высокой активностью по отношению к гидролизной извести корродированного в процессе автоклавной обработки кремнезема силикатного кирпича. Отрицательное влияние на твердение цементного камня оказывает перлит, обладающий чрезвычайно высокой водопотребностью.

Т а б л и ц а 3.6

Кинетика нарастания прочности цементного камня

№ п/п	Наполнитель	$S_{уд}$ м ² /кг	В/Т	Прочность при сжатии, МПа			
				1 сут	3 сут	7 сут	28 сут
1	-	-	0,26	<u>30,5*</u> 32,0	<u>58,5</u> 65,0	<u>80,0</u> 83,5	<u>91,0</u> 96,2
2	«Бой» силикатного кирпича	405	0,24	<u>38,5</u> 38,6	<u>77,0</u> 73,2	<u>87,2</u> 85,0	<u>94,5</u> 96,5
3	«Бой» силикатного кирпича	1025	0,23	<u>39,5</u> 39,7	<u>78,1</u> 74,5	<u>83,5</u> 86,1	<u>99,1</u> 97,7
4	Отход от срезки «горбуши»газобетона	413	0,26	<u>20,8</u> 27,0	<u>56,2</u> 60,0	<u>68,0</u> 78,5	<u>78,1</u> 87,5
5	Отход от срезки «горбуши»газобетона	1343	0,28	<u>19,1</u> 28,8	<u>55,3</u> 59,1	<u>67,2</u> 77,4	<u>78,1</u> 86,5
6	Микрокремнезем ЧМК	1500	0,50	<u>28,2</u> -	<u>56,5</u> -	<u>68,0</u> -	<u>88,0</u> -
7	Микрокремнезем ПО «Сода»	2000	0,50	<u>35,5</u> 36,0	<u>68,2</u> 71,2	<u>88,8</u> 88,0	<u>100,0</u> 92,5
8	Перлит	812,3	0,6	<u>6,5</u> 9,8	<u>14,3</u> 14,5	<u>25,8</u> 25,0	<u>40,0</u> 33,5
9	Перлит	1012	0,66	<u>6,0</u> 8,8	<u>13,1</u> 13,9	<u>24,9</u> 24,8	<u>39,7</u> 32,4

Примечание. В числителе – цемент ПО «Осколцемент», в знаменателе – цемент ПО «Сода» (г. Стерлитамак).

Для определения изменений в составе вяжущего при применении добавок и обнаружения новых фаз, образовавшихся в результате направленного воздействия на процессы структурообразования, опытные образцы цементного камня с автоклавированными отходами на основе «боя» силикатного кирпича различной дисперсности подвергались рентгенофазовому анализу. Ультрадисперсный наполнитель вводился в количестве 20 % от массы цемента (рис.3.2). Дисперсность силикатного кирпича для состава №2 составляла 405 м²/кг и для состава №3 – 1025 м²/кг.

На рентгенограммах (см. рис. 3.2) отчетливо видны пики, характерные для портландита 4,887, 2,629, 1,793 Å – для контрольного образца; 4,887, 2,621, 1,792 Å – для образцов с добавкой «боя» силикатного кирпича. Гидроксиды кальция в контрольном образце идентифицируются в виде твердого раствора C₅H (Å) – 3,033, 2,771, 1,921, а в образцах с добавками «боя» силикатного кирпича – 5,698, 4,230, 3,022, 2,738, 2,621, 2,603, 1,824, 1,817 Å.

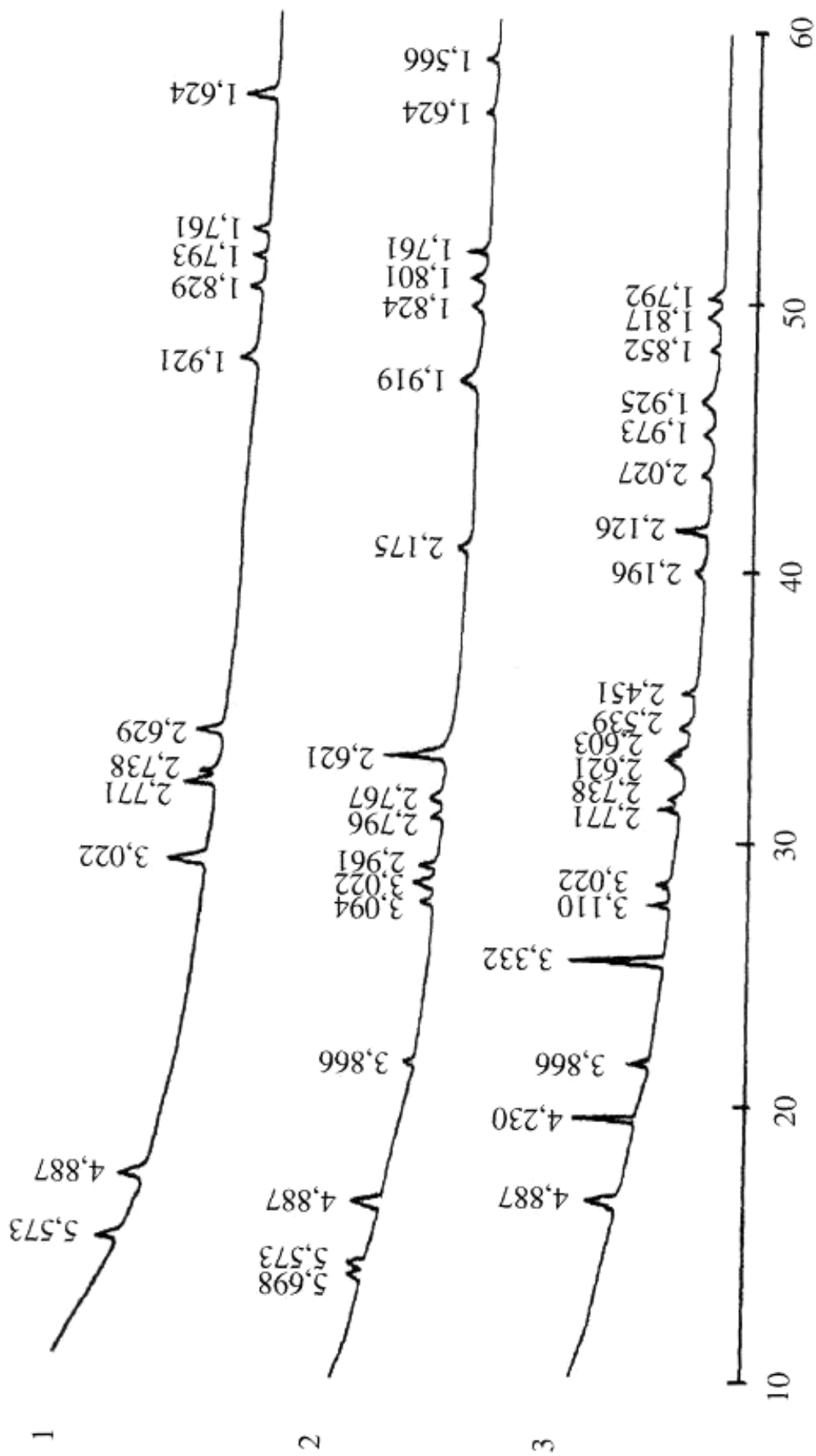


Рис 3.2. Рентгенограммы фазового состава цементного камня, модифицированного УДМН:
 1 – контрольный без добавки; 2 – с добавкой силикатного кирпича $S_{уд} = 405 \text{ м}^2/\text{кг}$; 3 – то же $S_{уд} = 1025 \text{ м}^2/\text{кг}$

Зафиксировано присутствие в контрольном образце тоберморитоподобной фазы: 5,573, 2,771, 2,738, 1,829 Å. В отличие от контрольного состава в образцах с добавками «боя» силикатного кирпича присутствует тоберморит синтетического αCaO и $\gamma\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ($x \approx 1$, $\gamma \approx 1$, $z \approx 1$): 5,573, 3,332, 3,11, 3,094, 2,961, 2,796, 2,771, 2,767, 2,196, 2,175, 1,973, 1,8552, 1,822 Å

Характерно, что самый большой пик 3,332 Å принадлежит цементной композиции с ультрадисперсной добавкой «боя» силикатного кирпича с $S_{\text{уд}} = 1025 \text{ м}^2/\text{кг}$. Как в контрольном цементном камне, так и с добавками микронаполнителей обнаружены наличие остаточного алита C_3S по характерным его отражениям для контрольного образца – 1,761 Å, для образцов с «боем» силикатного кирпича – 2,621, 2,126, 1,925, 1,919, 1,761 Å, а также наличием остаточного белита $\beta\text{-C}_2\text{S}$ по характерным его отражениям: для контрольного образца – 1,624 Å, для образцов с «боем» силикатного кирпича – 2,621, 2,603, 1,824, 1,817 Å

Присутствие линий C_3S и $\beta\text{-C}_2\text{S}$ указывает на незавершенность процесса кристаллизации гидратации водных силикатов кальция и образование выделяющихся фаз в возрасте 28 суток. Это можно объяснить более высокой реакционной активностью минерального автоклавированного наполнителя высокой удельной поверхности. Аморфизированные частицы тонкомолотого силикатного кирпича содержат хорошо сформированные при высокой температуре гидросиликатные фазы. Кроме того, гидросиликатные фазы образуются при взаимодействии гидролизной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с дисперсным кварцем SiO_2 , присутствующим в силикатном кирпиче.

Заслуживает внимания установленный факт, что в образцах с добавкой силикатного кирпича не обнаружено кварца, которого в кирпиче содержится более 75 % от его массы. В связи с этим можно полагать, что кварцевые частицы песка в силикатном кирпиче настолько сильно корродированы известью в процессе автоклавной обработки, что при последующем измельчении они становятся чрезвычайно активными, полностью реагируют с гидролизной известью и не уступают по активности аморфному микрокремнезему.

Подтверждением этому служит оценка фазового состава продуктов взаимодействия ультрадисперсного силикатного кирпича УДМН с известью, как основных продуктов гидратированного цемента. Для этого «бой» силикатного кирпича подвергался тонкому измельчению в мельнице Palvinsette до удельной поверхности $405 \text{ м}^2/\text{кг}$ и смешивался с гидролизной известью ЧДА в соотношении 1:3. Водотвердое отношение составляло $V/T = 0,15$. Твердение опытных образцов осуществлялось в нормально-влажностных условиях в течение 5 сут. Прочность известково-силикатных образцов на момент испытания составила 6,2 МПа.

Выполненный рентгенофазовый анализ (рис.3.2, 3.3) подтверждает образование, наряду с преобладающими фазами кварца, кальцита и арагонита, низкоосновных гидросиликатов кальция вида $2\text{CaOSiO}_2 \cdot 0,35\text{H}_2\text{O}$.

Таким образом, ультрадисперсные автоклавированные отходы силикатного кирпича с удельной поверхностью не менее $1025 \text{ м}^2/\text{кг}$, содержащие в своем составе низкоосновные гидросиликаты кальция (SCH), как составные центры и затравки кристаллизации, и аморфизированный SiO_2 , способный активно связывать гидролизную известь.

Позитивное действие добавок на структурообразование цементного камня, обусловленное образованием повышенного количества низкоосновных гидросиликатов кальция и способствующее упрочнению структуры цементного камня в сочетании с низкой водопотребностью ультрадисперсного силикатного кирпича, будет способствовать достижению и более низких показателей воздушной усадки. Подтверждение этого гипотетического предположения можно найти в последующих разделах.

Учитывая высокую стоимость микрокремнезема, соизмеримую для отдельных регионов со стоимостью цемента, проводят исследования влияния комплексных минеральных модификаторов на основе микрокремнезема и технических продуктов в присутствии СП С-3 на кинетику набора прочности камня. В приведенных далее результатах экспериментов удельная поверхность силикатного кирпича была доведена до $1025 \text{ м}^2/\text{кг}$, а газобетона – до $1343 \text{ м}^2/\text{кг}$ при их плотности соответственно $1,55$ и $2,1 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Для оценки влияния комплексных минеральных модификаторов на основе микрокремнезема (МК) и автоклавированного отхода «боя» силикатного кирпича (СК) готовились смеси при следующих соотношениях компонентов МК:СК=3:1, МК:СК=1:1, МК:СК=1:3. Принимая долю силикатного кирпича в смеси за X , а долю микрокремнезема как $1-X$, согласно правилу аддитивности определяли плотности смеси следующих наполнителей из выражения

$$\rho_{\text{см}} = [\rho_{\text{СК}} \cdot X + \rho_{\text{МК}} \cdot (1-X)] / 1,$$

где $\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси микрокремнезема БС-120, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{СК}}$ – плотность молотого «боя» силикатного кирпича, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{МК}}$ – плотность микрокремнезема БС-120, $\text{кг}/\text{м}^3$.

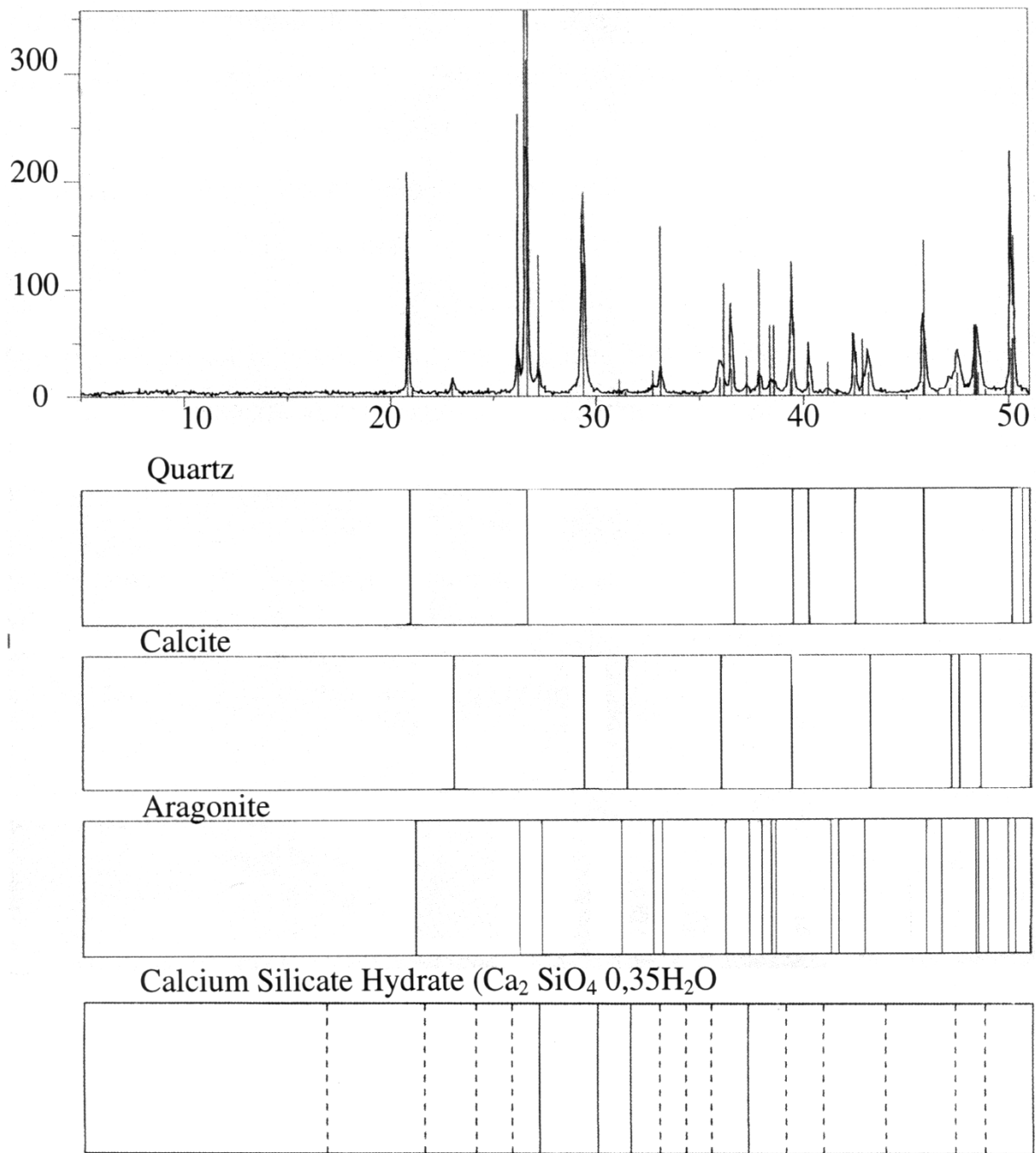


Рис. 3.3. Рентгенограмма фазового состава цементного камня, модифицированного УДМН силикатный кирпич с известью

На рис. 3.4 представлено изменение плотности смеси наполнителей в зависимости от их соотношения. Как следует из рис. 3.4, расчетная зависимость носит линейный характер, а экспериментальные данные описываются экспоненциальной функцией.

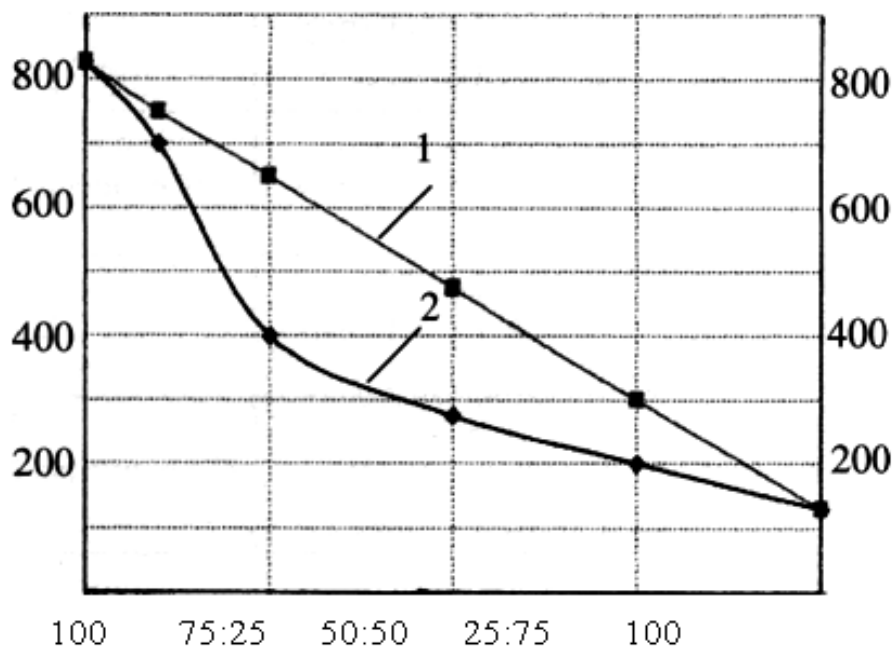


Рис. 3.4. Зависимость плотности смеси от соотношения микрокремнезема БС-120 (МК) и «боя» силикатного кирпича (СК) по аддитивности и по данным эксперимента:
1 – по правилу аддитивности; 2 – по эксперименту

Выполненные исследования свидетельствуют о значительном повышении прочности цементного камня с введением ультрадисперсного силикатного кирпича и комплексной органоминеральной добавки на его основе, а также микрокремнезема (табл. 3.7).

Т а б л и ц а 3.7

Влияние ультрадисперсных минеральных модификаторов на прочность пластифицированного цементного камня

№ п/п	Состав смешанного вяжущего, %	Содержание добавки С-3, %		Прочность, МПа, в возрасте		
				1 сут	3 сут	28 сут
1	2	3	4	5	6	7
1	Цемент-100	-	0,26	29,0	66,0	87,3
2	Цемент-100	ВСП-1,0	0,19	40,5	68,2	94,1
3	Цемент-75,5 Микрокремнезем-12,5	СДН-1,0	0,21	43,12	85,7	95,3
4	Цемент-75,5 Силикатный кирпич-12,5	СДН-1,0	0,18	49,8	88,3	99,1
5	Цемент-75,5 Газобетон-12,5	СДН-1,0	0,21	42,5	80,1	96,7

Окончание табл. 3.7

1	2	3	4	5	6	7
6	Цемент-75,5 Силикатный кирпич-6,25 МК-6,25	СДН-1,0	0,195	44,1	101,2	106,9
7	Цемент-75,5 Газобетон-6,25 МК-6,25	СДН-1,0	0,195	41,6	82,1	97,9
8	Цемент-75,5 Силикатный кирпич-9,375 МК-3,125	СДН-1,0	0,185	50,1	103,9	109,4

При замене 50 и 75 % микрокремнезема на силикатный кирпич в смешанном вяжущем прочность его достигает 50,1 и 44,1 МПа соответственно. При этом общее содержание наполнителя составляло 20 %. Целесообразность замены микрокремнезема диктуется и экономическим аспектом. При стоимости микрокремнезема 20000 руб./т стоимость 1 м бетона может быть снижена на 500-1000 руб.

Повышение активности тонкомолотого силикатного кирпича, корродированного в гидротермальных условиях, объясняется тем, что в этих условиях вода способна обратимо проникать в силикатную сетку SiO_2 , поврежденную в процессе помола кварцевого песка. В результате образуются дефектные гидротермальные группы путем разрыва связей $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ и тем самым увеличивается их реакционная активность, т.е. способность к химическим превращениям в присутствии извести и продуктов гидратации цемента. При удельной поверхности силикатного кирпича, близкой к дисперсности микрокремнезема, активность его возрастает вследствие повышенного количества не только точечных дефектов, но и числа дислокаций [62].

Таким образом, высокая дисперсность техногенных отходов – это процесс аморфизации при измельчении и повышения реакционно-химической активности кварца, которые вызваны гидротермальными условиями и являются важными факторами повышения прочности цемента и возможности замены части высокопрочного микрокремнезема на автоклавированные отходы строительной индустрии.

Применение высокодисперсных, химически активных наполнителей низкой водопотребности с $S_{уд}=1025-1343 \text{ м}^3/\text{кг}$ может быть чрезвычайно перспективным для получения плотных малоусадочных твердеющих структур. Результаты исследований объемных изменений цементного камня и высокопрочного бетона с использованием таких микронаполнителей изложены в следующих разделах.

4. УСАДКА И УСАДОЧНАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

4.1. Влияние вида и дисперсности наполнителей на усадку и усадочную трещиностойкость модифицированного цементного камня

Для оценки влияния вида и дисперсности наполнителей на процессы усадки и набухания были использованы ультрадисперсные отходы от срезки «горбуши» газобетона и «бой» силикатного кирпича, подготовленные по методике, изложенной в разд. 2. Для сравнения применялся перлит. В результате распыления были выделены наполнители с различной удельной поверхностью: «бой» силикатного кирпича $S_{уд}=405 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $S_{уд}=1025 \text{ м}^2/\text{кг}$; отход от срезки «горбуши» газобетона $S_{уд}=413 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $S_{уд}=1343 \text{ м}^2/\text{кг}$; перлит $S_{уд} = 812 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $S_{уд} = 1012 \text{ м}^2/\text{кг}$. По литературным данным, оптимальное наполнение цементных систем тонкомолотым кварцевым песком [33], гранулированными шлаками [24, 47], золами-уносами [16, 53], отходами бетона [35], стеклонеполнителем [98], обеспечивающими максимальную прочность, составляет 8-12,5 %. Кроме того, в бетонах с суперпластификаторами, как известно, целый ряд дисперсных наполнителей усиливает реологическое действие суперпластификатора, особенно тогда, когда дисперсный наполнитель вводится в качестве дисперсного носителя суперпластификатора [21, 35, 51, 52, 115].

В связи с этим оценка влияния вида и дисперсности наполнителей осуществлялась при двух способах его введения: с суперпластификатором в составе органоминеральной добавки и без него. При этом дозировка СП С-3 в органоминеральном модификаторе составляла 10 % от расхода минерального компонента и не превышала 1,0 % от расхода цемента. Дозировка минерального компонента принималась 5, 15, 25 % от расхода цемента. При проведении исследований применяли портландцемент марки ПЦ500Д0 ПО «Осколцемент». Кинетика набора прочности и объемные изменения цементного камня, модифицированного УДМН, представлены в табл. 4.1, 4.2. Для сравнения использовали смесь силикатного кирпича и микрокремнезема БС-120 в соотношении компонентов 3:1. Содержание силикатного кирпича составляло 75 %, а микрокремнезема – 25 %. Усадочные деформации цементного камня, модифицированного смесью силикатного кирпича и микрокремнезема, составили 0,95 мм/м.

Таблица 4.1

Кинетика набора прочности модифицированного цементного камня

№ п/п	Вид и содержание органоминеральной добавки		В/Ц	Прочность при сжатии, МПа		
	вид наполнителя	$S_{уд}$, м /кг		дозировка наполнителя	1 сутки	3 сутки
1	-	-	0,250	29,0	41,5	86,7
2			0,185	28,9	61,6	88,9
3	Силикатный кирпич	405	0,189	26,6	55,2	79,1
4		25	0,192	26,4	56,6	75,2
5			0,186	28,3	67,1	90,8
6	Силикатный кирпич	1025	0,190	25,7	54,0	77,4
7		25	0,193	21,0	46,2	68,1
8			0,185	24,6	45,6	76,3
9	Газобетон	413	0,188	25,4	48,4	70,5
10		25	0,192	23,9	51,7	40,7
11			0,187	29,8	59,5	89,8
12	Газобетон	1343	0,189	26,3	62,4	89,1
13		25	0,194	24,2	57,9	76,6
14			0,210	19,5	36,3	45,6
15	Перлит	812	0,240	17,8	26,5	36,1
16		25	0,260	11,4	19,6	26,4
17			0,212	17,1	26,4	32,3
18	Перлит	1012	0,243	13,1	19,8	26,8
19		25	0,275	8,9	14,7	22,0

Таблица 4.2

Объемные изменения цементного камня

№ п/п	Вид и содержание вид наполнителя	$S_{уд}$ М ² /кг	дозировка наполнителя	В/Ц	Усадка, мм/м			Набухание, мм/м
					при $\theta = 70-80\%$	при $\theta = 5-10\%$	полная после высушивания при $t = 105^{\circ}\text{C}$	
1	-	-	-	0,250	0,54	1,00	2,50	2,10
2	Силикатный кирпич	405	5	0,185	0,35	0,45	1,00	0,90
3			15	0,189	0,30	0,55	1,27	1,50
4			25	0,192	0,50	0,65	1,60	1,30
5			5	0,186	0,35	0,40	0,80	0,86
6	Силикатный кирпич	1025	15	0,190	0,35	0,50	0,98	0,65
7			25	0,193	0,45	0,70	1,30	0,45
8			5	0,185	0,32	0,60	0,95	1,10
9	Газобетон	413	15	0,188	0,36	0,53	1,10	0,95
10			25	0,192	0,34	0,70	1,48	1,30
11			5	0,187	0,29	0,50	0,81	0,50
12	Газобетон	1343	15	0,189	0,28	0,40	1,00	0,40
13			25	0,194	0,30	0,46	1,30	0,45
14			5	0,210	0,32	0,70	1,02	1,25
15	Перлит	812	15	0,240	0,33	0,62	1,20	1,00
16			25	0,260	0,40	0,90	1,62	1,50
17	Перлит	1012	5	0,212	0,38	0,58	0,95	0,50
18			15	0,243	0,35	0,54	1,20	0,40
19			25	0,275	0,34	0,70	1,30	0,50

Как следует из табл. 4.2, высушивание до полного удаления свободной влаги закономерно приводит к значительному возрастанию усадочных деформаций цементного камня как контрольного состава, так и состава, модифицированного УДМН. Для непластифицированного цементного камня контрольного состава при В/Ц = 0,25 они увеличиваются с 0,82 до 2,5 мм/м. Введение УДМН позволяет снизить усадочные деформации цементного камня на всех трех этапах испытания независимо от вида наполнителя. Значительная часть усадочных деформаций реализовалась в течение первых 30–60 сут (рис. 4.1, 4.2, 4.3).

Введение высокодисперсных наполнителей снижает деформации усадки модифицированного цементного камня. Установлено, что в воздушно-влажностных условиях усадка цементного камня с УДМН при дозировках 5–25 % изменяется в пределах 0,2–0,5 мм/м, а в условиях высушивания до полного удаления адсорбционной связанной воды уменьшается и достигает 1,2 мм/м; 0,95 мм/м; 1,1 мм/м; 1,3 мм/м соответственно для «боя» силикатного кирпича, смеси «боя» силикатного кирпича и микрокремнезема, отхода от срезки «горбуши» газобетона и перлита. Снижение усадки в условиях полной сушки составляет соответственно 46, 38, 44 и 50 % по отношению к контрольному составу.

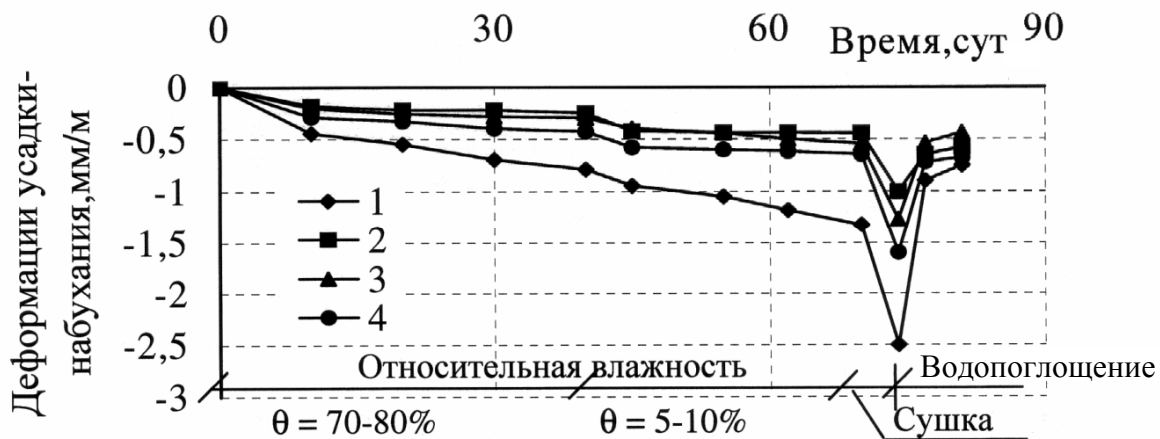
После обработки экспериментальных данных на ЭВМ получены математические зависимости изменения усадочных деформаций цементного камня следующего вида: $\varepsilon=f(D,S)$ (рис.4.4, 4.5).

Оптимальная дозировка наполнителя в комплексном органоминеральном модификаторе, обеспечивающая минимальные деформации усадки, достигает 10-15 % независимо от вида наполнителя (рис. 4.6).

Повышение дозировки УДМН свыше этого значения приводит к увеличению усадочных деформаций цементного камня. Так, усадочные деформации цементного камня в условиях полной сушки при 105 °С, наполненного «боем» силикатного кирпича, с увеличением дозировки от 5 до 25 %, при удельной поверхности $S_{уд}=405 \text{ м}^2/\text{кг}$, возрастают с 1,0 до 1,6 мм/м, а при $S_{уд}= 1025 \text{ м}^2/\text{кг}$ достигают всего лишь 0,8–1,3 мм/м. Незначительно отличаются деформации цементного камня, наполненного газобетоном и перлитом. При введении в цементные композиции газобетона с $S_{уд}=413 \text{ м}^2/\text{кг}$ деформации цементного камня составляют 0,95–1,48 мм/м, а с $S_{уд}=1343 \text{ м}^2/\text{кг}$ – 0,81–1,3 мм/м. Деформации цементного камня, модифицированного перлитом, достигают 1,02–1,62 мм/м при $S_{уд}= 812 \text{ м}^2/\text{кг}$ и 0,95–1,3 мм/м при $S_{уд}= 1012 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Вид наполнителя – «бой» силикатного кирпича

$$S_{уд} = 405 \text{ м}^2/\text{кг}$$



$$S_{уд} = 1025 \text{ м}^2/\text{кг}$$

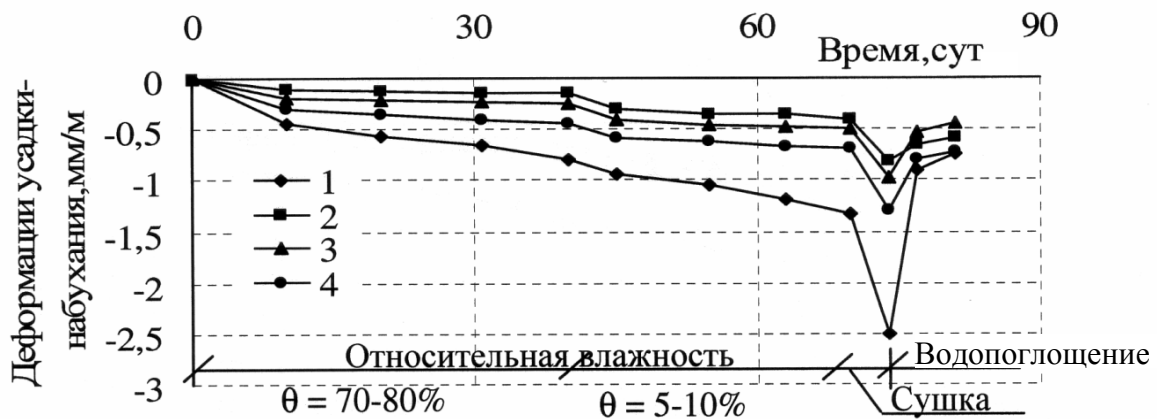
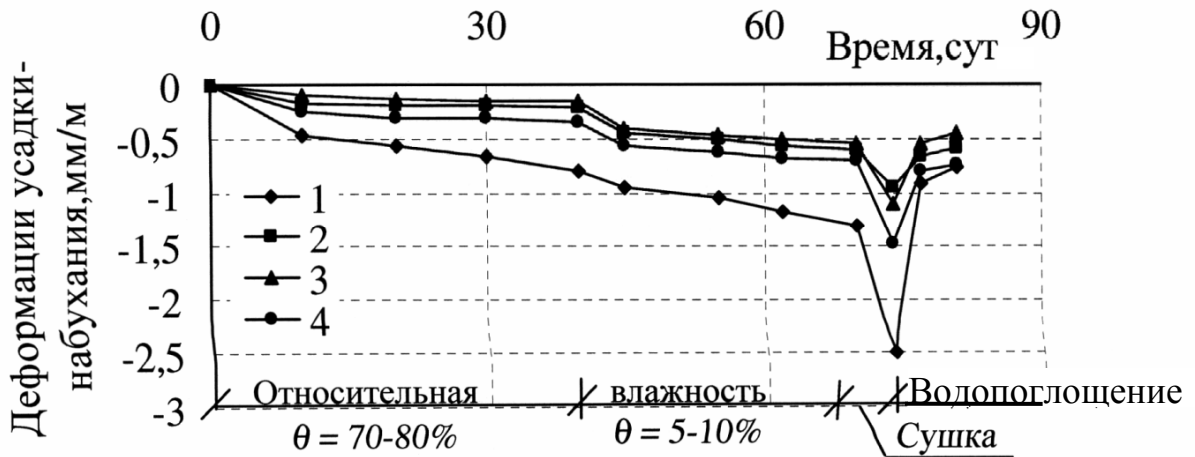


Рис. 4.1. Усадка цементного камня в зависимости от удельной поверхности и дозировки наполнителя:
 1 – контрольный, без наполнителя; 2 – цементный камень с добавкой наполнителя 5 %; 3 – то же 15 %; 4 – то же 25 %

Вид наполнителя – отход от срезки «горбуши»

$$S_{уд} = 413 \text{ м}^2/\text{кг}$$



$$S_{уд} = 1343 \text{ м}^2/\text{кг}$$

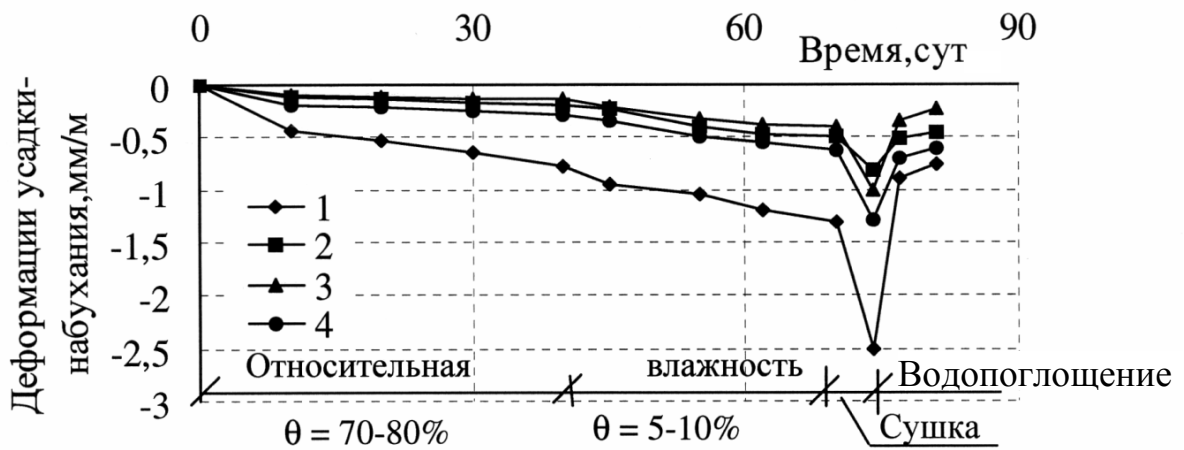
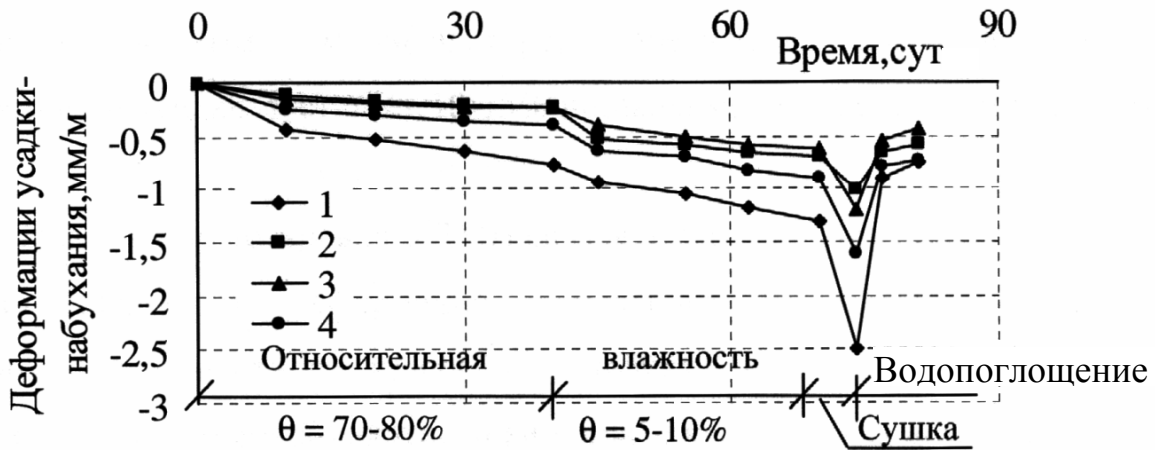


Рис. 4.2. Усадка цементного камня в зависимости от удельной поверхности и дозировки наполнителя: 1 – контрольный, без наполнителя; 2 – цементный камень с добавкой наполнителя 5 %; 3 – то же 15 %; 4 – то же 25 %

Вид наполнителя – перлит

$$S_{уд} = 812 \text{ м}^2/\text{кг}$$



$$S_{уд} = 1012 \text{ м}^2/\text{кг}$$

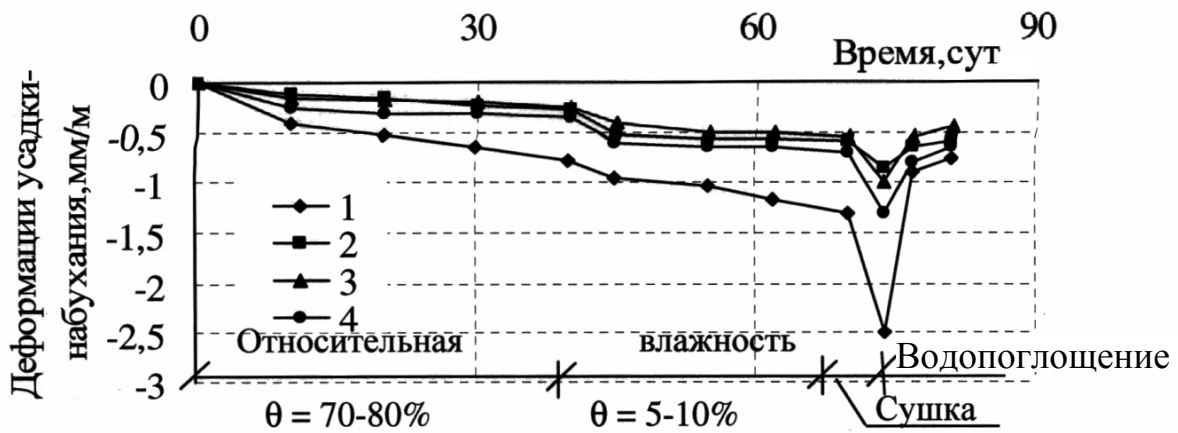
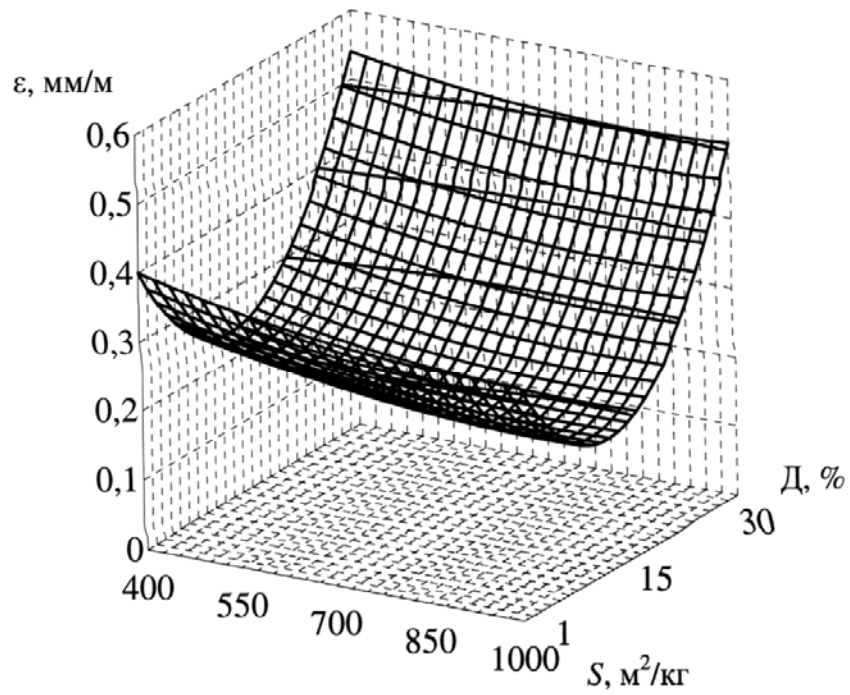


Рис. 4.3. Усадка цементного камня в зависимости от удельной поверхности и дозировки наполнителя: 1 – контрольный, без наполнителя; 2 – цементный камень с добавкой наполнителя 5 %; 3 – то же 15 %; 4 – то же 25 %

Вид наполнителя – «бой» силикатного кирпича

а



б

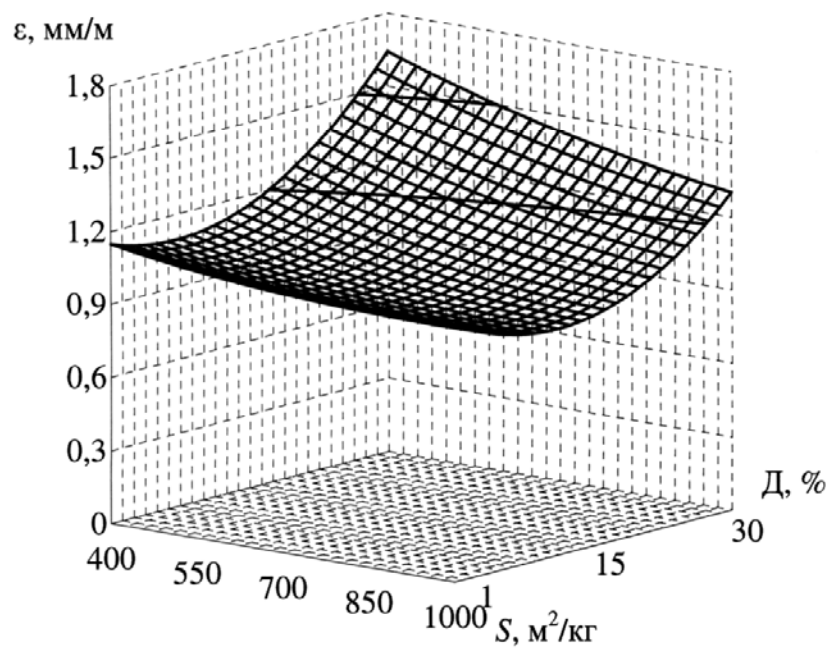
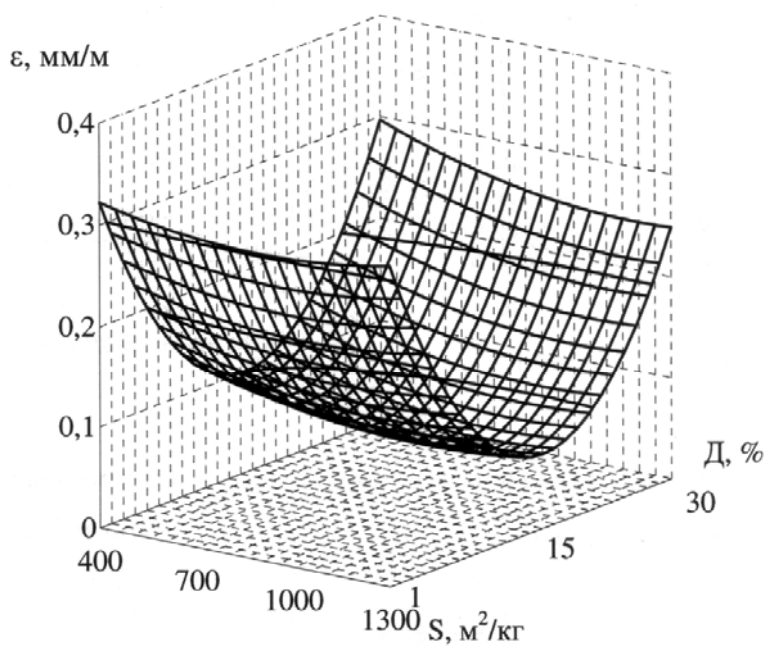


Рис. 4.4. Усадочные деформации цементного камня в зависимости от дозировки и удельной поверхности наполнителя:
а – при относительной влажности $\theta=70-80\%$;
б – в условиях полного высушивания при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$

Вид наполнителя – отход от срезки «горбуши» газобетона

а



б

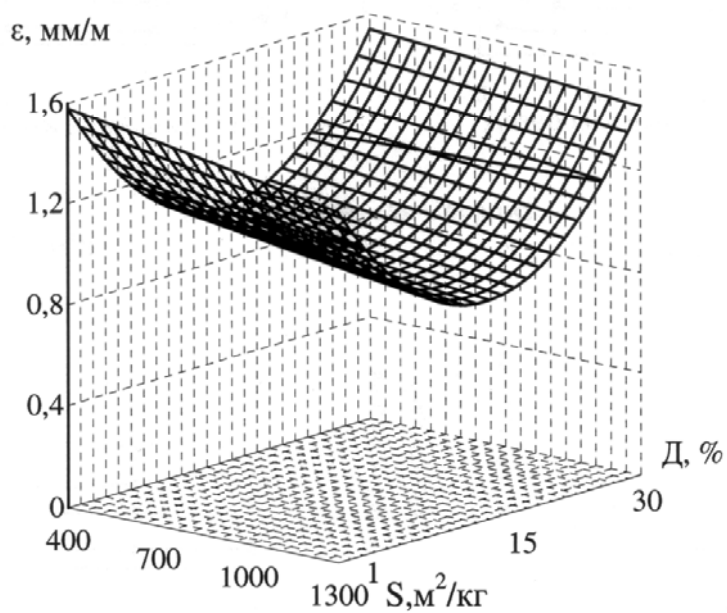
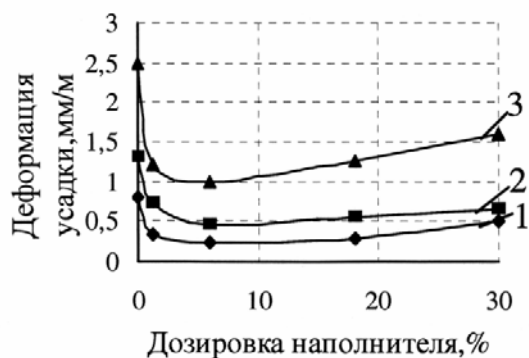


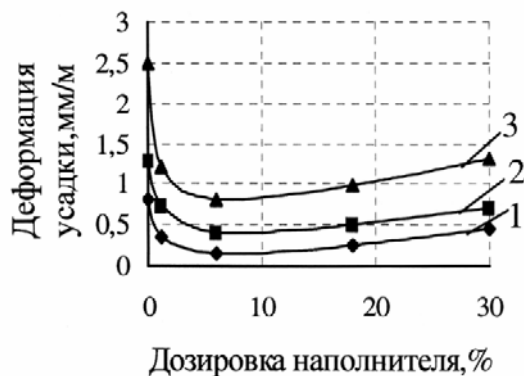
Рис. 4.5. Усадочные деформации цементного камня в зависимости от дозировки и удельной поверхности наполнителя:
а – при относительной влажности $\theta=70-80\%$;
б – в условиях полного высушивания при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$

Вид наполнителя - «бой» силикатного кирпича

$S_{уд} = 405 \text{ м}^2/\text{кг}$

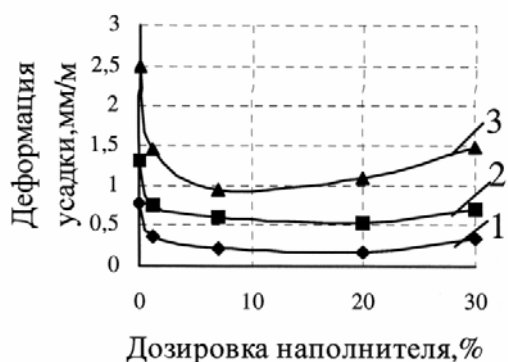


$S_{уд} = 1025 \text{ м}^2/\text{кг}$

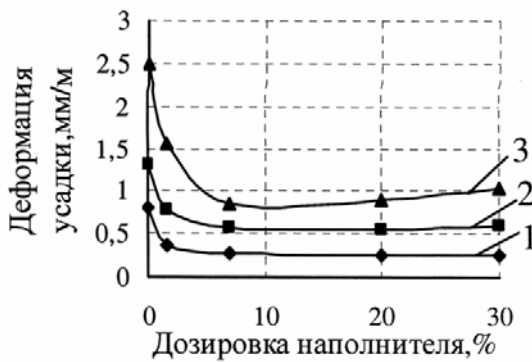


Вид наполнителя – отход от срезки «горбуши» газобетона

$S_{уд} = 413 \text{ м}^2/\text{кг}$

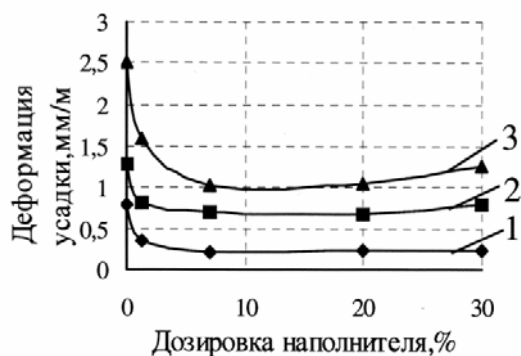


$S_{уд} = 1343 \text{ м}^2/\text{кг}$



Вид наполнителя - перлит

$S_{уд} = 812 \text{ м}^2/\text{кг}$



$S_{уд} = 1012 \text{ м}^2/\text{кг}$

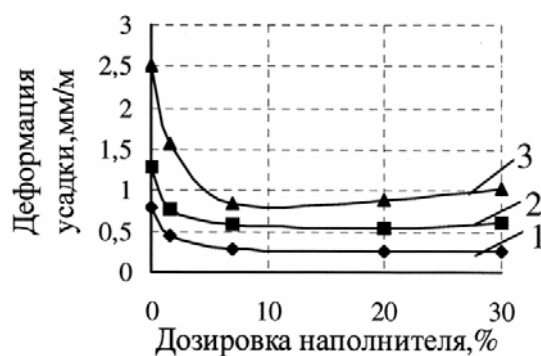


Рис. 4.6. Влияние дозировки и удельной поверхности наполнителей на усадку цементного камня:

1 – усадка при $\theta=70-80 \%$; 2 – то же при $\theta=5-10 \%$;
3 – полная усадка при 105°C

С повышением удельной поверхности ультрадисперсного наполнителя значительно увеличивается трещиностойкость модифицированного цементного камня. Жесткий цикл «насыщение в воде – высушивание» является наиболее показательным для визуальной оценки трещиностойкости цементного камня (рис. 4.7). Как следует из рис. 4.7, ширина раскрытия трещин модифицированного цементного камня после пятого цикла составила: 0,1 мм – для «боя» силикатного кирпича, 0,12 мм – для отхода от срезки «горбуши» газобетона и перлита. Ширина раскрытия трещин образцов контрольного состава достигала 0,25 мм.

Трещины в цементном камне, модифицированном УДМН, с повышением удельной поверхности после пятого цикла практически отсутствуют. В процессе многократного циклического увлажнения и высушивания ширина раскрытия трещин цементного камня увеличивается.

После тринадцати циклов попеременного увлажнения и высушивания ширина раскрытия трещин цементного камня контрольного состава, без наполнителя, достигла 2,2 мм, тогда как цементный камень с наполнителем имел ширину раскрытия трещин, равную: 0,55 мм – для силикатного кирпича; 0,51 мм – для смеси «боя» силикатного кирпича и микрокремнезема БС-120; 0,64 мм – для газобетона и 0,18 мм – для перлита.

На рис. 4.8 представлена картина трещиностойкости цементного камня в зависимости от вида наполнителя и его дозировки. Повышение дозировки наполнителя при высокой удельной поверхности не оказывает значительного влияния на трещиностойкость цементного камня. Ширина раскрытия трещин цементного камня, модифицированного высокодисперсными автоклавированными отходами, с увеличением дозировки от 15 до 25 % составляет 0,04-0,05 мм.

Таким образом, цементный камень, характеризующийся значительно меньшими деформациями усадки в нормально-влажностных условиях и в условиях полной сушки при 105 °С, показал и значительно высокую трещиностойкость в результате многократного попеременного циклического «водонасыщения в воде – высушивания». Закономерно ожидать и высокую трещиностойкость бетона на его основе.

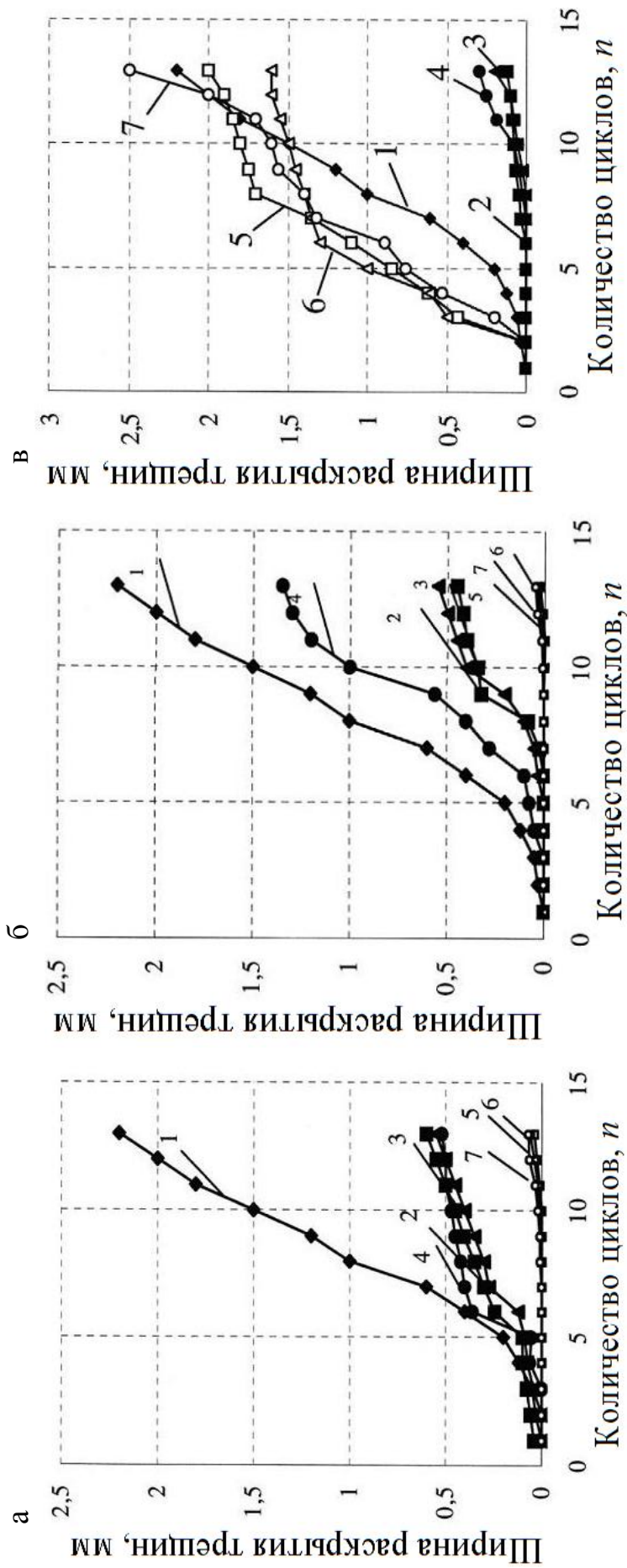


Рис. 4.7. Ширина раскрытия трещин цементного камня в процессе циклического «высушивания – набухания»:
а – «бой» силикатного кирпича; б – отходы от срезки «горбуши» газобетона;
в – перлит (номера составов приняты по табл. 4.4)

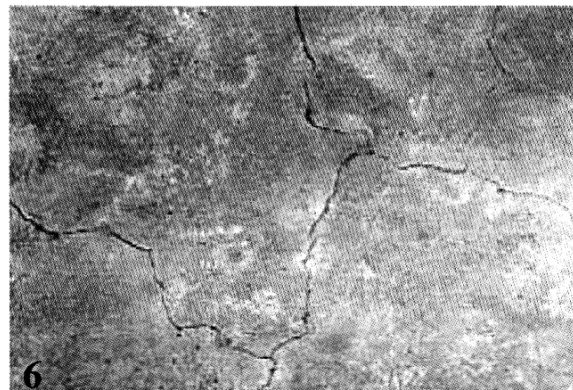
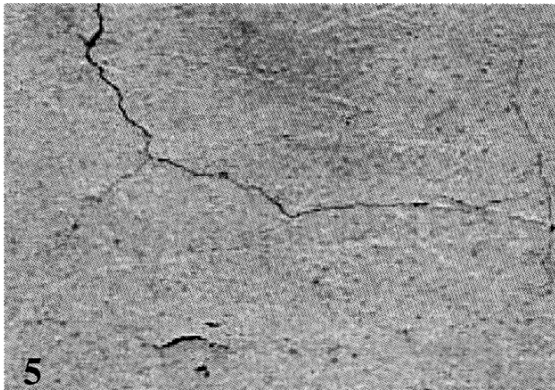
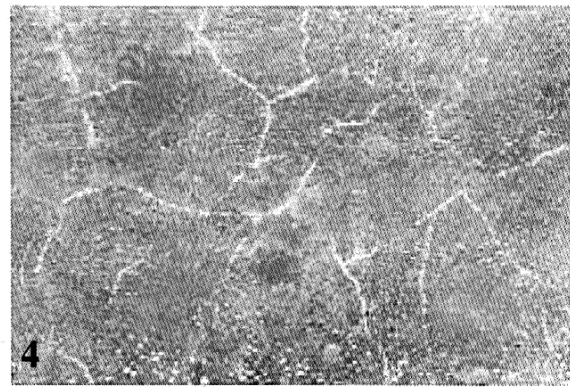
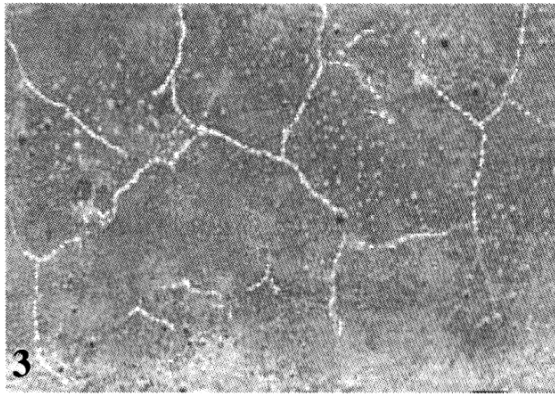
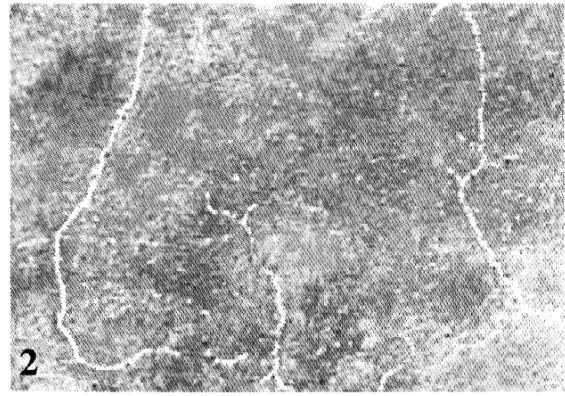
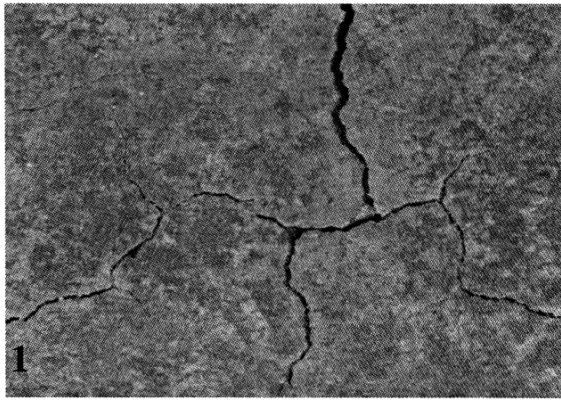


Рис. 4.8. Картина трещинообразования цементного камня:
1 – контрольный, без наполнителя; 2, 3 – наполнитель – «бой» силикатного кирпича в количестве 15,25 %; 4 – то же – отход от срезки «горбуши» газобетона в количестве 15 %; 5, 6 – то же – перлит в количестве 15,25 %

4.2. Усадка и усадочная трещиностойкость бетона с ультрадисперсными модификаторами

Естественно, что в пластифицированных высокопрочных бетонах при низких водоцементных отношениях, высокой плотности цементного камня и значительной степени наполнения цементной матрицы мелким и крупным наполнителем деформации усадки и набухания будут восприниматься жестким безусадочным каркасом и усадочная трещиностойкость будет высокой. Литературные данные свидетельствуют о низких значениях воздушно-влажностной усадки высокопрочного бетона, не превышающих 0,3–0,5 мм/м в воздушно-влажностных условиях. Как показали результаты исследования, введение ультрадисперсных наполнителей в состав органоминерального модификатора позволяет снизить усадку цементного камня в среднем в 2,2 раза. Очевидно, для высокопрочного бетона в присутствии жесткого скелета из высокопрочных заполнителей следует ожидать значительно меньших объемных изменений в процессе попеременного увлажнения и высушивания. В связи с этим выполнена сравнительная усадка пластифицированного и непластифицированного высокопрочного бетона, модифицированного различными ультрадисперсными наполнителями.

Для сравнения усадочных деформаций готовились бетоны на трех видах наполнителя при их различных удельной поверхности и дозировках. В качестве крупного заполнителя использовали высокопрочный гранитный щебень марки М1400 фракции 5-10 мм Свердловского карьера, в качестве мелкого заполнителя – песок (отсев от ПГС) с модулем крупности 2,6. Расход материалов на 1 м бетонной смеси принят следующий: цемент – 562 кг, песок – 575 кг, щебень – 1322 кг. В/Ц-отношение бетонного контрольного состава составляло 0,4, а пластифицированного с органоминеральными добавками достигало 0,27–0,3.

Для выявления оптимальных дозировок дисперсного наполнителя и оптимизации составов цементного камня и высокопрочного бетона на его основе проводилось математическое планирование эксперимента с последующей обработкой данных на ЭВМ.

В качестве варьируемых переменных для различных видов наполнителя были приняты:

x_1 – содержание дисперсного наполнителя D , %;

x_2 – удельная поверхность S , м²/кг.

Для определения функциональной зависимости типа

$$y=f(x_1; x_2), \quad (4.1)$$

было использовано ортогональное центральное композиционное планирование эксперимента с варьированием каждой независимой переменной. Пределы изменения факторов представлены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Пределы варьирования переменных

Варьируемый фактор	Кодовое обозначение	Натуральные значения переменных, соответствующие кодовым				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Содержание добавки Д, %	x_1	7	1	13	25	19
Удельная поверхность S , м ² /кг:	x_1					
- «бой» силикатного кирпича		550	400	700	1000	850
- отход от срезки «горбуши» газобетона		625	400	850	1300	1075
- перлит		850	800	900	1000	950

В качестве ядра планирования принят полный факторный план типа 2^k , где $k = 2$ – число независимых переменных. При этом число опытов n определялось из выражения

$$n = 2k + 2k + 1 = 9. \quad (4.2)$$

«Плечо» плана, обеспечивающее его ортогональность, вычислялось из следующей формулы:

$$\alpha = \sqrt{2^{2/k}} \cdot \left(\sqrt{n} - 2^{2/k} \right). \quad (4.3)$$

В табл. 4.4 представлена матрица планирования в кодовом и натуральном выражениях.

В качестве выходных параметров были исследованы усадочные деформации цементного камня и бетона $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, мм/м, определяемые при относительной влажности соответственно $\theta = 70-80 \%$, $\theta = 5-10 \%$ и в условиях полной сушки при $105 \text{ }^\circ\text{C}$, а также прочность в возрасте 28 сут (табл.4.5).

Таблица 4.4

Матрица планирования высокопрочного бетона

№ п/п	Наименование переменных					
	в кодовом выражении		в натуральном выражении			
	x_1	x_2	Д, %	S , м ² /кг		
			«Бой» силикатного кирпича	Отход от срезки «горбуши» газобетона	Перлит	
1	+1	+1	25	1000	1300	1000
2	-1	+1	1	1000	1300	1000
3	+1	-1	25	400	400	800
4	-1	-1	1	400	400	800
5	+a	0	19	700	850	900
6	-a	0	7	700	850	900
7	0	+a	13	850	1075	950
8	0	-a	13	550	625	850
9	0	0	13	700	850	900

Таблица 4.5

Физико-механические показатели и усадка высокопрочного бетона

№ п/п	Прочность в возрасте 28 сут			Усадочные деформации, мм/м								
	«бой» силикатного кирпича	«Горбуши» отход от срезки газобетона	перлит	«бой» силикатного кирпича		отход от срезки «горбуши» газобетона		перлит				
				$\theta=70-80\%$	$\theta=5-10\%$	сушка при 105°С	$\theta=70-80\%$	$\theta=5-10\%$	сушка при 105°С	$\theta=70-80\%$	$\theta=5-10\%$	сушка при 105°С
1	110,5	97,2	55,4	0,30	0,55	0,70	0,19	0,45	0,85	0,40	0,65	0,98
2	64,8	63,5	41,4	0,40	0,50	0,80	0,30	0,60	1,00	0,45	0,80	1,15
3	101,2	95,6	51,4	0,45	0,80	1,10	0,25	0,50	1,00	0,60	0,90	1,20
4	62,2	61,9	56,2	0,30	0,45	0,70	0,35	0,60	1,00	0,55	0,90	1,10
5	100,1	79,2	45,5	0,23	0,48	0,77	0,21	0,43	0,87	0,50	0,72	1,04
6	98,6	78,5	47,3	0,19	0,30	0,58	0,17	0,41	0,76	0,47	0,75	1,02
7	95,8	81,5	49,9	0,20	0,30	0,50	0,15	0,40	0,76	0,40	0,62	0,95
8	92,0	78,7	52,8	0,25	0,45	0,85	0,20	0,42	0,85	0,51	0,80	1,10
9	93,3	80,8	0	0,20	0,30	0,50	0,18	0,40	0,75	0,45	0,75	1,00

Данная матрица пригодна для построения модели в виде полинома второй степени:

$$y = A_0 + A_1 \cdot D + A_2 \cdot S + A_3 \cdot D^2 + A_4 \cdot S^2 + A_5 \cdot D \cdot S, \quad (4.4)$$

где A_0, \dots, A_5 – коэффициенты уравнения регрессии.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии $\varepsilon = f(x_1; x_2)$ и их статистический анализ производились на ЭВМ.

После обработки экспериментальных данных на ЭВМ получены математические модели изменения величины усадочных деформаций высокопрочного бетона в зависимости от вида, дозировки и дисперсности используемых наполнителей.

Вид наполнителя – «бой» силикатного кирпича:

✓ $\theta = 70-80 \%$

$$\varepsilon = 0,3088 - 0,0103D - 0,000097S + 0,000872D^2,$$

✓ сушка при 105 °С

$$\varepsilon = 0,8687 - 0,00046D - 0,00058S + 0,00122D^2.$$

Вид наполнителя – отход от срезки «горбуши» газобетона:

✓ $\theta = 70-80 \%$

$$\varepsilon = 0,3513 - 0,0185D - 0,000077S + 0,000693D^2,$$

✓ сушка при 105 °С

$$\varepsilon = 0,9840 - 0,0250D - 0,000053S + 0,00117D^2.$$

Вид наполнителя – перлит:

✓ $\theta = 70-80 \%$

$$\varepsilon = 0,5877 - 0,0202D - 0,00003S + 0,00032D^2,$$

✓ сушка при 105 °С

$$\varepsilon = 1,4121 - 0,00087D - 0,00054S + 0,0000352D^2.$$

Приемлемость полученных уравнений подтверждена проверкой гипотезы адекватности по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_y^2}{S_{\text{ост}}^2}, \quad (4.5)$$

где S_y^2 – дисперсия адекватности, характеризующая неточность «подгонки» уравнения к экспериментальным данным; $S_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия, характеризующая неточность эксперимента.

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (y_i - \hat{y}_i)^2; \quad (4.6)$$

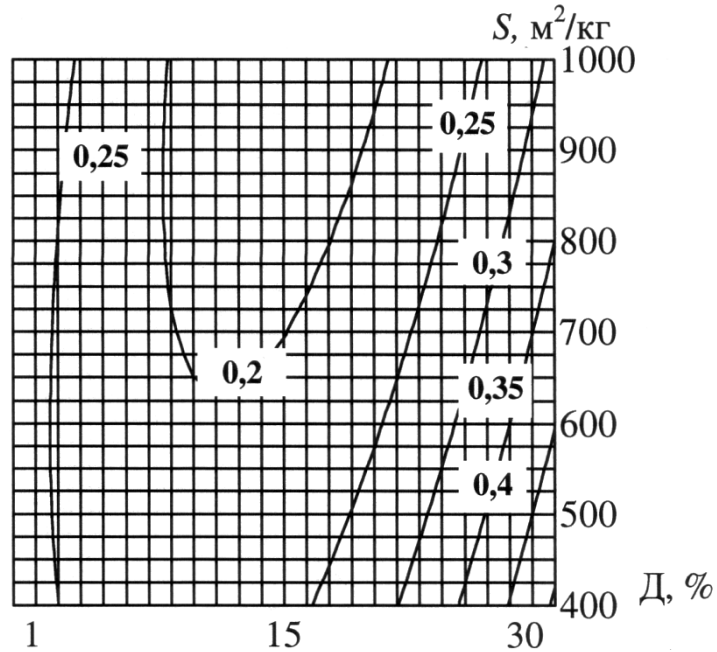
$$S_y^2 = \frac{1}{n-k-1} \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2, \quad (4.7)$$

где n – число опытов; k – число переменных.

Модель принимается, если расчетное значение критерия Фишера не превышает табличного значения ($F_p \leq F_m$) при заданном уровне значимости. Проверка уравнений по критерию Фишера подтвердила их адекватность.

Проведенные экспериментальные исследования и полученные уравнения регрессии позволяют дать количественную оценку каждого изучаемого фактора, а также определить влияние их совокупности на свойства высокопрочного бетона. На рис. 4.9 и 4.10 представлена графическая интерпретация полученных математических моделей.

а



б

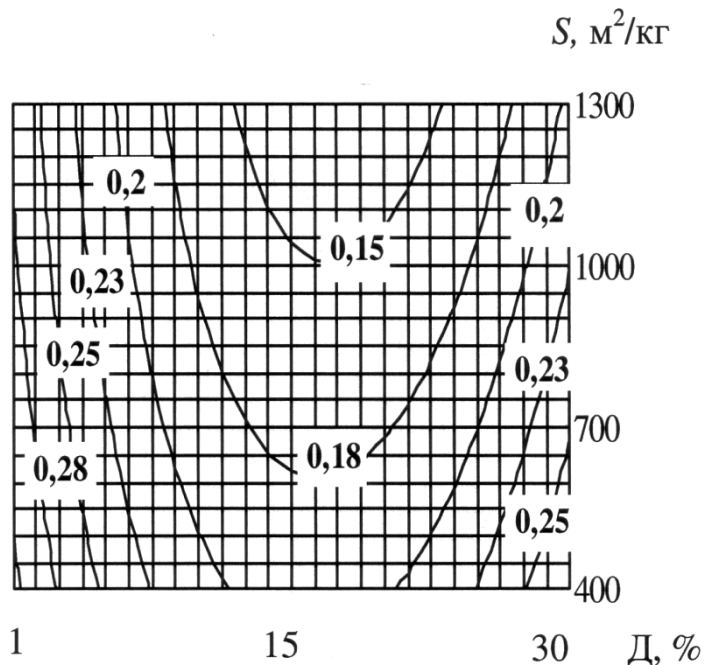


Рис. 4.9. Изолинии изменения усадочных деформаций бетона в воздушно-влажностных условиях $\theta=70-80\%$ в зависимости от вида, дисперсности и дозировки наполнителя:
 а – наполнитель – «бой» силикатного кирпича;
 б – то же – отход срезки «горбуши» газобетона

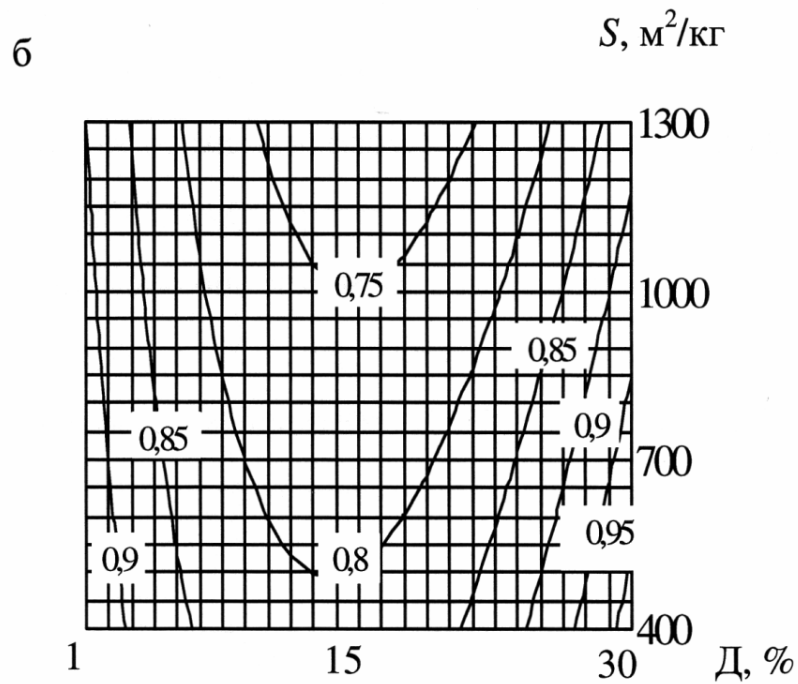
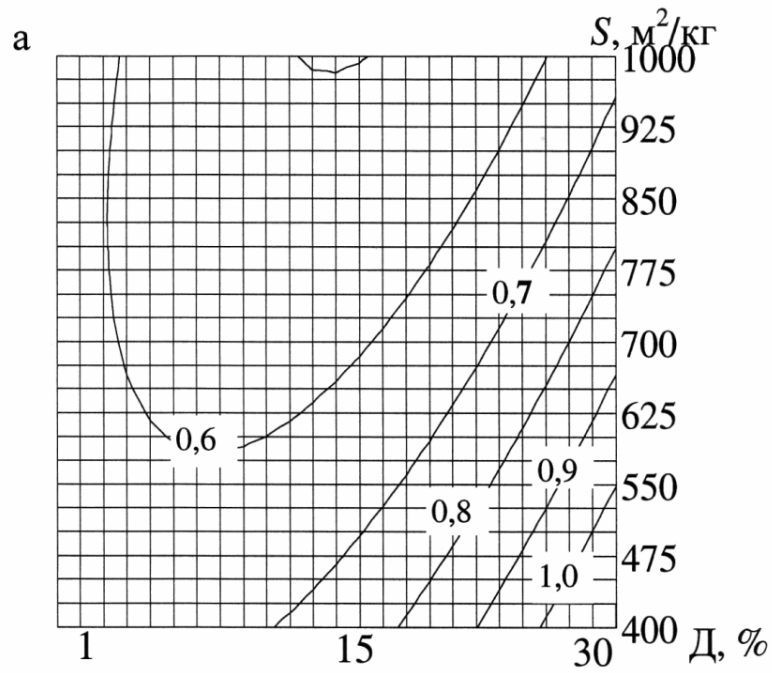


Рис. 4.10. Изолинии изменения усадочных деформаций бетона в условиях полного высушивания при $105^\circ C$ в зависимости от вида, дисперсности и дозировки наполнителя:
 а – наполнитель – «бой» силикатного кирпича;
 б – то же – отход срезки «горбуши» газобетона

Как следует из приведенных данных, значения деформации усадки бетона как контрольного состава (без наполнителей), так и модифицированного УДМН коррелируют с показателями усадки цементного камня.

Анализ проведенных исследований показал, что предельные значения деформаций усадки бетона, модифицированного УДМН, существенно ниже по сравнению с бетоном контрольного состава (без наполнителя).

Так, для бетона контрольного состава полная усадка после высушивания при 105 °С достигает 1,75 мм/м, а для бетона с УДМН не превышает 0,45–1,1 мм/м, в зависимости от вида наполнителя. В воздушно-влажностных условиях при $\theta=70-80\%$ деформации бетона составляют всего лишь 0,2–0,4 мм/м.

Из представленных на рис. 4.9, 4.10 графических зависимостей четко прослеживается взаимосвязь между дозировкой и удельной поверхностью применяемых наполнителей. Так, с увеличением удельной поверхности, независимо от вида и дозировки наполнителя, усадка высокопрочного бетона уменьшается. Наиболее высокие показатели снижения деформаций зафиксированы для бетона, модифицированного «боем» силикатного кирпича и отходом от срезки «горбуши» газобетона. Деформации набухания бетона с УДМН при нахождении его в воде до полного насыщения также остаются значительно меньше деформаций набухания бетона контрольного состава, без наполнителя. Так, деформации набухания бетона, модифицированного «боем» силикатного кирпича, составляют 0,25–0,7 мм/м, в то время как для бетона контрольного состава они достигают 1,2 мм/м (табл. 4.5).

Оптимальная дозировка УДМН, обеспечивающая минимальные деформации усадки, находится в пределах 10-15 % (рис. 4.11). С увеличением дозировки минерального наполнителя свыше 15% усадочные деформации возрастают.

Исследовано влияние УДМН на усадочную трещиностойкость (рис. 4.12) высокопрочных бетонов. Как следует из рис. 4.12, ширина раскрытия трещин бетона с УДМН после 13-го цикла составила: для силикатного кирпича – 0,057 мм, газобетона – 0,058 мм, перлита – 0,21 мм, а контрольного состава без УДМН достигла 1 мм. С увеличением удельной поверхности вводимого наполнителя ширина раскрытия трещин высокопрочного бетона уменьшается.

Так, ширина раскрытия трещин модифицированного бетона при использовании силикатного кирпича с $S_{уд} = 405 \text{ м}^2/\text{кг}$ составила 0,057 мм, а с $S_{уд} = 1025 \text{ м}^2/\text{кг}$ – всего лишь 0,028 мм.

Аналогичная закономерность сохраняется и для ультрадисперсного наполнителя на основе отхода от срезки «горбуши» газобетона и перлита.

Таблица 4.6

Влияние комплексных ультрадисперсных минеральных модификаторов на прочность и усадку бетона

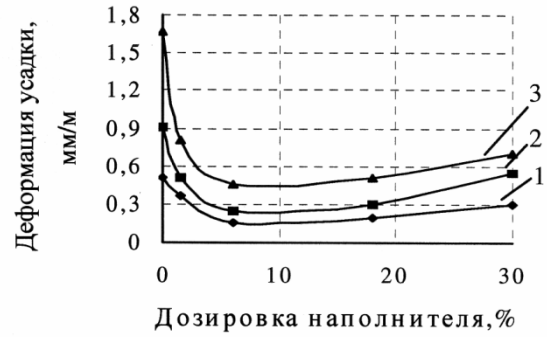
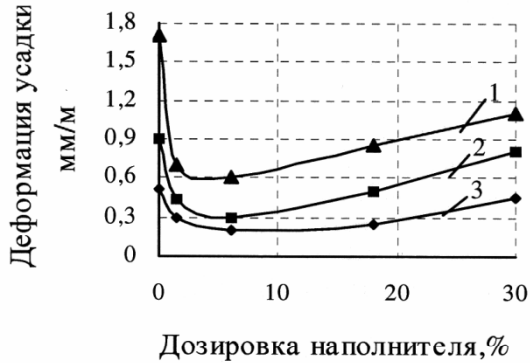
№ п/п	Состав смеси УДМН, %	В/Т	В _д , %	Прочность в возрасте, МПа			Усадка, мм/м		
				1 сут	7 сут	28 сут	θ = 70-80 %	θ = 5-10 %	сушка при 105 °С
1	—	0,45	—	23,0	43,0	64,3	0,5	0,9	1,75
2	«Бой» силикатного кирпича с $S_{уд} = 1025 \text{ м}^2/\text{кг} - 100$	0,26	42,2	39,9	59,4	93,5	0,25	0,31	0,55
3	«Бой» силикатного кирпича - 75 микрокремнезем - 25	0,28	37,8	41,2	61,5	102,2	0,20	0,30	0,45
4	Отход от срежки «горбуши» газобетона с $S_{уд} = 1343 \text{ м}^2/\text{кг} - 100$	0,28	37,8	38,1	54,9	90,8	0,17	0,40	0,80
5	Отход от срежки «горбуши» газобетона - 75 Микрокремнезем - 25	0,29	35,5	39,4	60,8	101,1	0,22	0,33	0,46

Примечание. Суммарное содержание комплексной УДМН составляет 20 % от расхода цемента; дозировка С-3 – 1,0 %

Вид наполнителя - «бой» силикатного кирпича

$$S_{уд} = 405 \text{ м}^2/\text{кг}$$

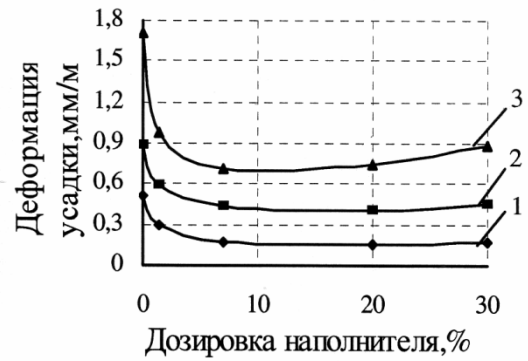
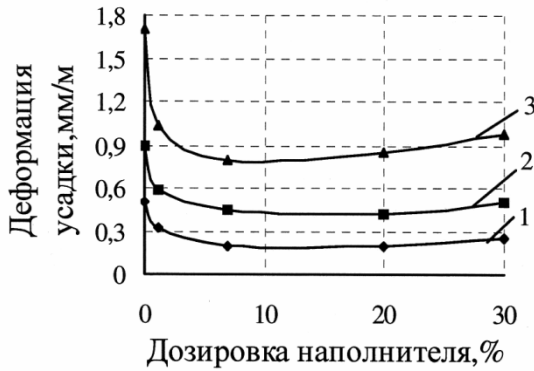
$$S_{уд} = 1025 \text{ м}^2/\text{кг}$$



Вид наполнителя - отход от срезки «горбуши» газобетона

$$S_{уд} = 413 \text{ м}^2/\text{кг}$$

$$S_{уд} = 1343 \text{ м}^2/\text{кг}$$



Вид наполнителя - перлит

$$S_{уд} = 812 \text{ м}^2/\text{кг}$$

$$S_{уд} = 1012 \text{ м}^2/\text{кг}$$

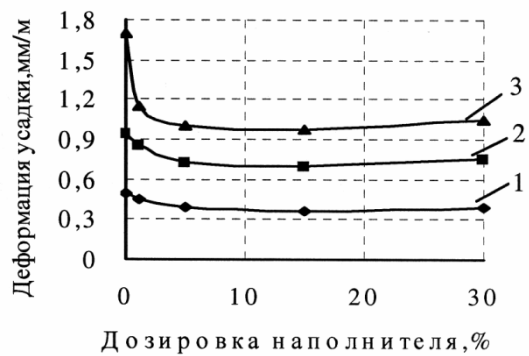
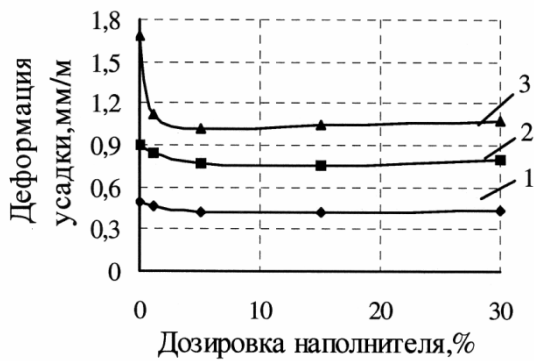


Рис. 4.11. Влияние дозировки и удельной поверхности наполнителя на усадку высокопрочного бетона:

- 1 – усадка при $\theta=70-80$ %; 2 то же при 5-10 %;
3 – полная усадка при 105 °С

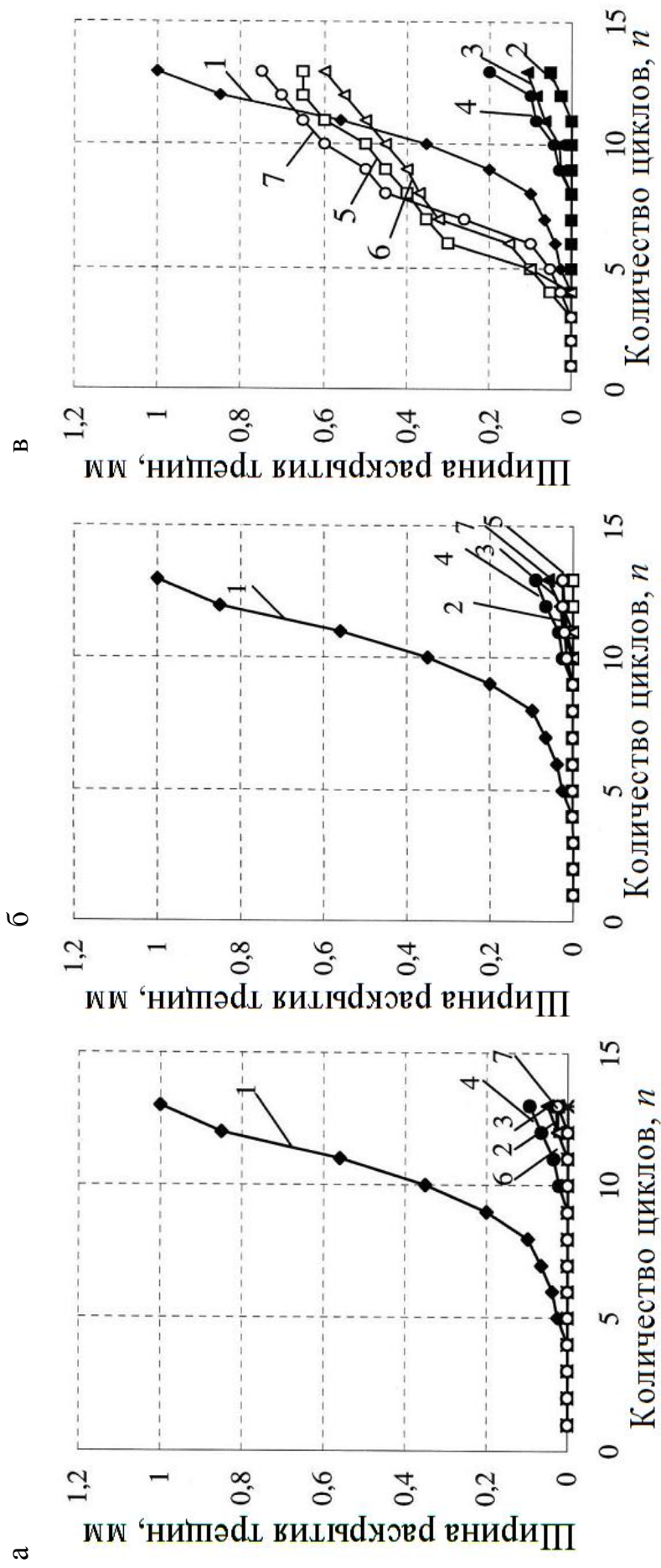


Рис. 4.12. Ширина раскрытия трещин высокопрочного бетона в процессе циклического «высушивания – набухания»:
 а – «бой» силикатного кирпича; б – отходы от срежки «горбуши» газобетона;
 в – перлит (номера составов приняты по табл. 4.7)

Таким образом, бетон, модифицированный техногенными УДМН и характеризующийся значительно меньшими деформациями усадки в нормально-влажностных условиях и в условиях полной сушки при 105 °С, показал и высокую трещиностойкость в результате многократного попеременного циклического «водонасыщения в воде – высушивания». На рис. 4.13 показана картина трещинообразования высокопрочного бетона в зависимости от вида, дозировки и дисперсности наполнителя. Ширина раскрытия трещин контрольного состава без УДМН после седьмого цикла достигала 0,1 мм, в то время как трещины на бетоне, модифицированном УДМН, отсутствовали, независимо от удельной поверхности наполнителя. Дальнейшее попеременное циклическое увлажнение и высушивание бетона, модифицированного УДМН, приводит к незначительному раскрытию трещин.

Выполнены исследования усадки и усадочной трещиностойкости бетона, модифицированного комплексным ультрадисперсным наполнителем, из микрокремнезема и техногенных отходов. Соотношение микрокремнезема и техногенных автоклавированных отходов было принято 1:3 (микрокремнезем – 25 %, а автоклавированный отход – 75 %). Суммарное содержание УДМН не превышало 20 % от расхода цемента. Процедура введения С-3 в комплексе с УДМН-модификатором не изменялась, а дозировка С-3 достигала 1,0 % от расхода цемента. Расход компонентов на 1 м бетонной смеси: цемент – 448 кг; песок – 560 кг; щебень – 1322 кг. Удобоукладываемость бетонной смеси соответствовала марки по удобоукладываемости III для всех выполненных составов. Водоредуцирующее действие С-3 составило 42,2 и 37,8 % соответственно для «боя» силикатного кирпича и отхода от срезки «горбуши» газобетона, а в смеси с микрокремнеземом – 37,8 и 35,5% (см. табл.4.6).

Структурообразование бетона с введением комплексного УДМН-модификатора обусловлено, с одной стороны, интенсивным ранним взаимодействием диоксида кремния микрокремнезема с гидролизной известью, выделяющейся при гидратации минералов силикатов; образующиеся при этом новые фазы гидросиликатов кальция наращиваются на CSH-фазы как затравки кристаллизации, внесенные с ультрадисперсным силикатным кирпичом.

С другой стороны, аморфизированный при измельчении SiO_2 также вступает в химическое взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием новых порций гидросиликатов кальция. В целом, высокие активизирующие действие УДМН низкой водопотребности на основе техногенных отходов в комплексе с высокой реакционно-химической активностью микрокремнезема играет важную модифицирующую роль в формировании прочности и плотности бетона, что неизбежно сказывается на его усадке.

Усадка бетона с комбинированной добавкой на основе порошка из «боя» силикатного кирпича и микрокремнезема составляет 0,2–0,22 мм/м в воздушно-влажностных условиях и не превышает 0,45–0,46 мм/м в

условиях полной сушки. При этом образования трещин после 13 циклов попеременного увлажнения-высушивания не наблюдается (рис.4.13).

Таким образом, для обеспечения минимальной усадочной трещиностойкости в процессе попеременного циклического увлажнения и высушивания дисперсность минеральных модификаторов должна быть не менее 1025-1343 м²/кг, а оптимальная степень наполнения – в пределах 10-15 %, в зависимости от вида минерального наполнителя. Установленная оптимальная величина наполнения бетона с комбинированной добавкой на основе порошка микрокремнезема и автоклавированных техногенных отходов, обеспечивающая минимальную усадку и повышенную усадочную трещиностойкость, может быть доведена до 15-20 % без снижения прочности.

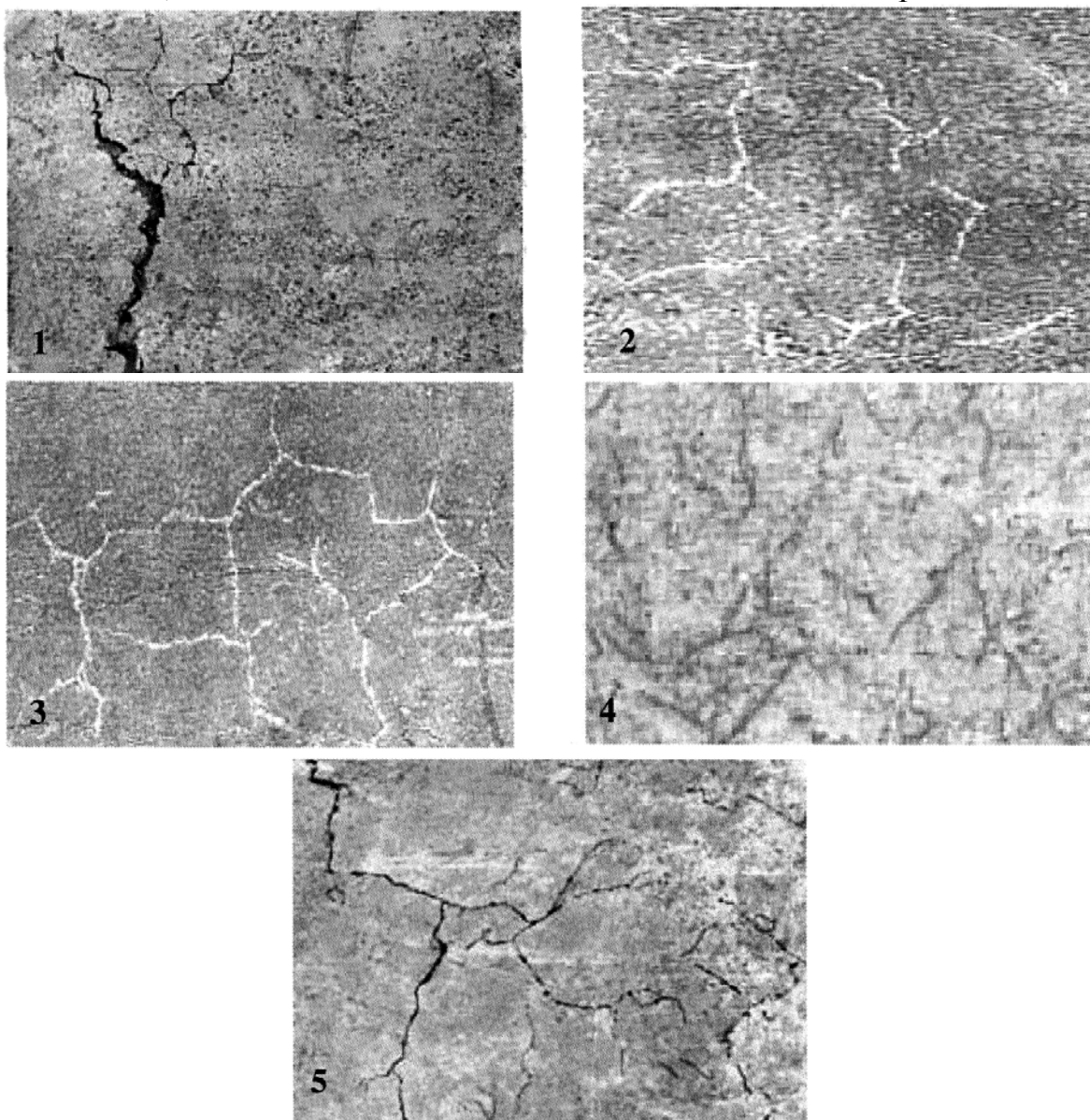


Рис. 4.13. Картина трещинообразования бетона в зависимости от вида и дозировки наполнителя:
1 – контрольный, без наполнителя; 2 – наполнитель – «бой» силикатного кирпича; 3 – то же отход от срезка «горбуши» газобетона;
4 – то же смесь силикатного кирпича и БС-120; 5 – то же перлит

5. ВЛИЯНИЕ АРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ОБЪЕМНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА

Для армирования бетона применяют различные металлические и неметаллические волокна. Ввиду чрезвычайно широкого ассортимента предлагаемых волокон, остается открытым вопрос о выборе наиболее эффективных из них. Основные виды и характеристики волокон приведены в табл. 5.1.

Из металлических в качестве фибр обычно применяют тонкую проволоку диаметром 0,1–0,5 мм, нарубленную на отрезки 5–50 мм. При повышении диаметра фибр свыше 0,6 мм резко уменьшается эффективность влияния дисперсного армирования на прочность бетона [6].

Стальные фибры вводят в бетонную смесь обычно в количестве 1–2,5% объема бетона (3–9% по массе, что составляет 70–200 кг фибры на 1 м³ смеси). В этом случае, по данным Ю.М. Баженова, повышаются прочность бетона на растяжение на 10–30%, сопротивляемость бетона ударам, а также его предел усталости и износостойкость [6].

Из неметаллических волокон могут применяться стеклянные волокна, базальтовые, асбестовые и др. Стеклянные волокна обычно имеют диаметр порядка нескольких десятков микрометров и длину 20–40 мм. Они обладают высокой прочностью на растяжение (1500–3000 МПа), и модуль деформации у них выше, чем у цементного камня. Температурный коэффициент линейного расширения стекловолокна близок к такому коэффициенту цементного камня.

К основным характеристикам фибр [53] следует отнести:

- геометрические параметры;
- механические свойства;
- технологические параметры;
- специальные свойства.

Геометрические параметры – это длина, диаметр или приведённый диаметр (площадь поперечного сечения), форма поперечного сечения, отношение длины к диаметру, форма, состояние поверхности.

Различные эксплуатационные и технологические характеристики сталефибробетона обеспечиваются применением фибр с различными характеристиками. К ним прежде всего следует отнести механические показатели (временное сопротивление растяжению, модуль упругости, относительное удлинение) и геометрические характеристики (длина фибр, соотношение длины и диаметра (приведенного диаметра), наличие анкеров, форма и площадь поперечного сечения, состояние поверхности, наличие шероховатостей, насечки, покрытия) [53].

Таблица 5.1

Основные виды и характеристики волокон

Наименование волокон	Характеристика волокон						
	Прочность на растяжение	Модуль упругости, ГПа	Диаметр, мкм	Длина, мм	Плотность, кг/м ³	Удлинение при разрыве, %	
Стальное	500-2000	200	5-500	5-15	7800	0,5-3,5	
Стеклоанное	3500	71	14	6	2680	2-3,5	
Целлюлозное	600	60	15	3	1500	-	
Полиакрилонитрильное	300	8	37	6	1180	3	
Полипропиленовое	700	5	50	13	910	15-50	
Из поливинилового спирта	1900	41	14	2	1300	-	
Арамидное	3600	65-133	10	-	-	2,1-4,0	
Углеродное	2600	230	9	-	-	-	
Нейлон	300-500	4	-	-	1,16	13-15	
Акрил	400-1000	14-19,5	18	-	-	3	
ПАН Ricem	600-1000	>15	6-20	-	1,18	5-10	

Замечено, что более длинные фибры, при одинаковом диаметре, более склонны к комкованию на всех технологических переделах: загрузке, транспортировке, выгрузке, дозировке, подаче в смеситель и перемешивании смеси. Соответственно, чем меньше длина фибр, при прочих равных условиях, тем меньше их склонность к образованию комков. Однако чем больше длина фибр, тем больше усилие, необходимое для их выдергивания из тела затвердевшего бетона, и тем выше сопротивление сталефибробетона растяжению. Когда эта величина достигает критического значения, фибра рвется. Дальнейшее увеличение длины практически не влияет на механические свойства сталефибробетона [53].

С уменьшением диаметра повышается эффективность фибрового армирования, но усложняется технология приготовления смеси и изготовления изделий.

Введение волокон в бетонную смесь понижает ее подвижность и вызывает определенные трудности и в приготовлении смеси цемента, воды, заполнителя и фибр. Обычно приходится несколько увеличивать в подобных смесях количество воды и содержание мельчайших частиц (цемента и мелкого заполнителя).

Стальными или неметаллическими волокнами армируют, как правило, мелкозернистые бетоны, иногда цементный камень. Эффективность применения волокон в бетоне зависит от их содержания и расстояния между отдельными волокнами [6].

Эффективность влияния различных видов волокон на свойства бетона зависит от соотношения модулей упругости армирующих волокон и бетона. При отношении $E_v/E_b > 1$ возможно получение фибробетонов с повышенной прочностью на растяжение и трещиностойкостью. При $E_v/E_b < 1$ повышаются ударная прочность и сопротивление материала истираемости.

Еще одной важной характеристикой является величина сцепления фибр с бетонной матрицей. Для увеличения сцепления между стальной фибровой арматурой и бетоном рекомендуются проволоки периодического профиля с рельефной и деформированной поверхностью, проволоки прямоугольного и квадратного сечений, с переменным по длине сечением, переходящим от круглой к прямоугольной форме, а также гнутые фибры, фибры с отгибами на концах, с различного рода анкерами и т.д. Одной из важных технологических операций является очистка поверхности стальных канатов от имеющейся на ней смазки, которая препятствует сцеплению фибр с бетоном в конструкциях.

Согласно литературным данным повысить прочность фибробетона, снизить их усадочные деформации можно путем обработки волокон силаном, озоном, бихроматом калия и др. [37].

Наиболее эффективные способы обработки проволоки — окисление при температуре 600 °С, нанесение на поверхность проволоки покрытия из эпоксидной смолы и цемента, а также горячее и электролитическое

цинкование. При механической обработке наибольший эффект получен при загибании петель на концах проволок. Однако введение в бетонную смесь проволоки с петлевыми концами может затруднить перемешивание такой смеси [24].

Канат подвергают термической обработке, например путем его отжига или электротермического нагрева. Смазка с поверхности каната удаляется, а содержащийся в канате органический (пеньковый) сердечник отжигается.

Как было показано ранее, высокодисперсные наполнители в цементных композициях оказывают положительное влияние на процессы структурообразования, прочность наполненных бетонов и другие физико-механические показатели [34].

Вместе с тем известно, что цементные бетоны, обладая высокой прочностью при сжатии, имеют сравнительно низкую прочность при растяжении и изгибе. С целью исключения этого недостатка используются различные способы, одним из которых является дисперсное армирование бетона, которое рассматривается как эффективное средство повышения прочности на растяжение и изменения образования трещин на всех уровнях его структуры [36, 37, 73, 100, 124].

В связи с этим на основании известных теоретических представлений об эффективном использовании армирующих добавок выявлено влияние полиамидных волокон на прочность, усадку и усадочную трещиностойкость цементного камня и бетона, в том числе модифицированного добавками УДМН (рис. 5.1). В качестве армирующих элементов приняты включения, условно разделяемые по соотношению l/d (l – длина, d – диаметр включения) на:

- элементы в виде ультрадисперсных минеральных частиц, для которых $l/d = 1$;
- элементы в виде волокон ($l/d \gg 1$).

Армирующим элементом на макромасштабном уровне следует считать волокна, а на микромасштабном уровне (уровне цементного камня) – вводимые совместно с цементом высокодисперсные минеральные наполнители.

Волокна Rhoimat NIL характеризуются следующими свойствами:

➤ плотность, г/см ³	1,17
➤ диаметр, мкм	15-18
➤ прочность на растяжение, МПа	500
➤ модуль упругости, ГПа	2-4
➤ относительное удлинение при разрыве, %	60

Экспериментально выявлены зависимости в системе «рецептурно-технологические факторы – прочность – усадочная трещиностойкость» дисперсно-армированных цементного камня и бетона как индивидуально на отдельных структурных уровнях, так и при комплексном двухуровневом дисперсном армировании.



Рис. 5.1. Полиамидное волокно Rhoimat NIL

5.1. Влияние вида и содержания армирующих элементов на прочность бетона

Для оценки влияния вида и дозировки полиамидного волокна на прочность бетона были использованы три вида волокон, различающихся соотношением l/d : полиамидные волокна длиной 6 мм с $l/d = 400$, длиной 12 мм с $l/d = 800$ и длиной 18 мм с $l/d = 1200$.

Приготовление фибробетона производили в следующей последовательности. В раствор ПАВ (С-3 + SMF в количестве 0,48% + 0,32% от расхода цемента) вводили волокно и перемешивали в лабораторном смесителе с вертикальным валом в течение 40-80 с. В распушенное таким образом волокно добавляли цемент и вновь осуществляли перемешивание до получения однородной суспензии. Затем в полученную суспензию добавляли заполнитель в соответствии с принятой дозировкой. Расход материалов на 1 м бетонной смеси составлял: цемент – 562 кг, песок – 575 кг, щебень – 1322 кг.

Водоцементное отношение контрольного состава без пластификатора составляло 0,4, а с суперпластификатором – 0,27, при этом осадка конуса бетонной смеси достигала 4-6 см.

Для приготовления опытных образцов использовали портландцемент марки ГЩ-500Д0 ПО «Осколцемент», высокопрочный гранитный щебень фракций 5-10 мм и песок (отсев от ПГС) с модулем крупности 2,6.

Как следует из данных, приведенных в табл. 5.2, суточная прочность $R_{сж}$ бетона контрольного состава составляла 18,4 МПа, а бетона с полиамидными волокнами увеличивалась в зависимости от длины используемого волокна на 40, 70 и 39% при длине используемого волокна соответственно 6, 12 и 18 мм. Максимальная суточная прочность фибробетона, достигавшая 31,4 МПа, обеспечивалась на волокнах длиной 6 мм при их дозировке $1,0 \text{ кг/м}^3$ бетона. Однако, если к ним добавить минеральный наполнитель, то прочность возрастает до 33,2 МПа. С увеличением длины используемого волокна свыше 6 мм, прочность снижается и составляет 27,6 МПа, что превышает контрольное значение. Выявлено понижение суточной прочности бетона с увеличением длины используемого волокна свыше 6 мм. Прочность бетона с волокнами длиной 12 и 18 мм составляла соответственно 26,4 и 20,4 МПа, что превышает контрольное значение прочности бетона без волокон.

Установленные закономерности сохраняются и при оценке нормативной прочности фибробетона в возрасте 28 суток. В зависимости от длины волокна нормативная прочность увеличивается в среднем на 11-13%. Превышение прочности бетона, армированного волокнами в комплексе с минеральным силикатным кирпичом, составляет 38 и 44%.

Испытания фибробетонных образцов высокопрочного бетона показали, что наличие в их составе полиамидных волокон способствует значительному росту прочности на растяжение при изгибе. Так, для контрольного состава прочность бетона при изгибе составляет 5,5 МПа, для бетона, армированного волокнами, достигает соответственно: 8,7 МПа – при длине волокна 6 мм; 8,0 МПа – 12 мм и 6,7 МПа – 18 мм, а для бетона, армированного волокнами в комплексе с силикатным кирпичом, достигает соответственно: 11,2 МПа – при длине волокна 6 мм и 11,6 МПа – 12 мм.

Наиболее значительное повышение прочности бетона (на 34%) по отношению к контрольному составу зафиксировано при использовании волокон длиной 6 мм. Таким образом, комплексное дисперсное армирование бетона тонкомолотыми минеральными наполнителями и полиамидными волокнами способствует значительному повышению прочности бетона. На рис. 5.2 и 5.3 представлены наиболее характерные кривые изменения прочности фибробетона.

Таблица 5.2

Характеристика составов и кинетика набора прочности фибробетона

№ п/п	Вид наполнителя	Длина волокну, мм	Дозировка волокну, кг/м ³	Вид и дозировка СП		Прочность при сжатии в возрасте, сут			Прочность при изгибе в возрасте, 28 сут
				С-3	SMF	1 сут	7 сут	28 сут	
1	-	-	-	-	-	18,4	62,4	66,6	5,5
2	-	6	0,4	0,32	0,48	26,0	67,2	83,2	8,7
3	-	6	1,0	0,32	0,48	31,4	68,0	89,1	7,7
4	-	6	1,6	0,32	0,48	25,6	67,4	83,8	8,0
5	-	12	0,4	0,32	0,48	25,9	67,4	82,9	6,4
6	-	12	1,0	0,32	0,48	26,4	74,0	81,3	8,0
7	-	12	1,6	0,32	0,48	23,9	66,0	78,8	6,2
8	-	18	0,4	0,32	0,48	18,5	63,1	77,5	6,7
9	-	18	1,0	0,32	0,48	20,4	62,0	68,7	5,1
10	-	18	1,6	0,32	0,48	18,0	70,0	77,2	5,1
11	"Бой» сили- катного кир- пича-77	6	1,0	0,32	0,48	33,2	73,5	92,2	8,8
12	"Бой» сили- катного кирпича-77	12	1,0	0,32	0,48	27,6	81,4	96,0	8,4



Рис. 5.2. Суточная прочность фибробетона в зависимости от содержания и длины используемого волокна:
1 – длина волокна 6 мм; 2 – то же 12 мм; 3 – то же 18 мм

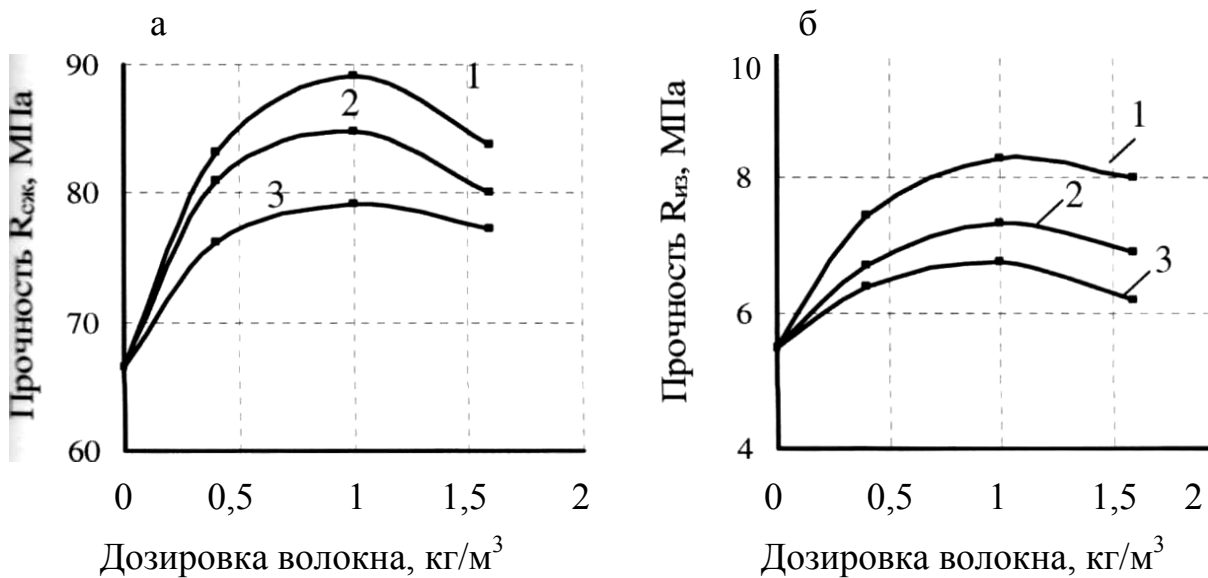


Рис. 5.3. Нормативная прочность бетона в зависимости от содержания и длины волокна:
а – прочность при сжатии; б – то же на растяжение при изгибе;
1 – длина волокна 6 мм; 2 – то же 12 мм; 3 – то же 18 мм

Однако наблюдаемое уменьшение прочности фибробетона с увеличением длины используемых волокон обусловлено, вероятно, уменьшением процентного содержания волокна в плоскости сечения разрушения и

понижением прочности сцепления на границе «волокно – цементная матрица».

Анализ характера разрушения бетона, армированного волокнами длиной свыше 12 мм, свидетельствует о том, что разрушение бетона происходит с достаточно хорошим участием волокон в работе цементной матрицы. При разрушении бетона с короткими волокнами наблюдается их частичное выдергивание.

Таким образом, при армировании бетона волокнами длиной свыше 12 мм их высокие механические характеристики используются не полностью.

Существует понятие критической длины волокна $L_{кр}$, для которой напряжение, воспринимаемое собственно волокном в композиции, возрастает и при $L=L_{кр}$ становится равным прочности волокна. Критическая длина волокна $L_{кр}$ зависит от исходной длины волокна и его диаметра, а также прочности сцепления на границе «волокно – матрица» в соответствии со следующим выражением [5]:

$$L_{кр} = \frac{0,5\sigma}{R_{сц} d_{ср}}, \quad (5.1)$$

где σ – усредненная прочность волокна; $d_{ср}$ – средний диаметр волокна; $R_{сц}$ – прочность сцепления на границе «волокно – матрица».

Наиболее простым решением эффективного использования длинных волокон является сочетание их с различными диспергируемыми порошковыми полимерами, увеличивающими адгезионную прочность на границе «волокно – цементная матрица».

5.2. Усадка цементного камня, модифицированного полиамидным волокном

На первом этапе исследований выполнена оценка влияния армирующих элементов на усадку трещиностойкость цементного камня.

В качестве армирующего элемента использовалось полиамидное волокно Rhoimat NIL фирмы Rodia длиной 0,8 и 6 мм. Дозировка волокна составила 0,07, 0,14, 0,21, 0,8, 1,6, и 2,4 кг/м³ бетона.

Усадочные деформации цементного камня с полиамидными волокнами представлены в табл. 5.3. Как следует из табл.5.3, высушивание до полного удаления свободной влаги закономерно приводит к значительному возрастанию усадочных деформаций цементного камня, при этом для цементного камня контрольного состава, без волокна (В/Ц = 0,250), они увеличиваются с 0,82 до 2,5 мм/м, а для цементного камня с волокнами (В/Ц = 0,180–0,199) – с 0,3 до 0,6 мм/м. Снижение В/Ц-отношения с 0,250 до 0,180 уменьшило общее значение усадочных деформаций цементного камня на всех этапах их измерения: в воздушно-влажностных условиях, в

воздушно-сухих и при высушивании. Наиболее интенсивный рост усадочных деформаций наблюдался для цементного камня контрольного состава.

Как следует из рис.5.4, деформации цементного камня с полиамидными волокнами на 22 % меньше, чем деформации цементного камня контрольного состава, без волокон.

Повышение концентрации полиамидного волокна способствует снижению деформаций усадки независимо от длины волокна (рис. 5.4). Интересно отметить, что равные деформации усадки цементного камня в пределах 1,06–1,02 мм/м получены с введением волокна длиной 0,8 и 6 мм, при их содержании соответственно 2,4 и 0,21 %. Таким образом, малоусадочные цементные композиции могут быть получены на более длинных волокнах при их меньшем содержании, что обуславливает экономическую целесообразность их применения.

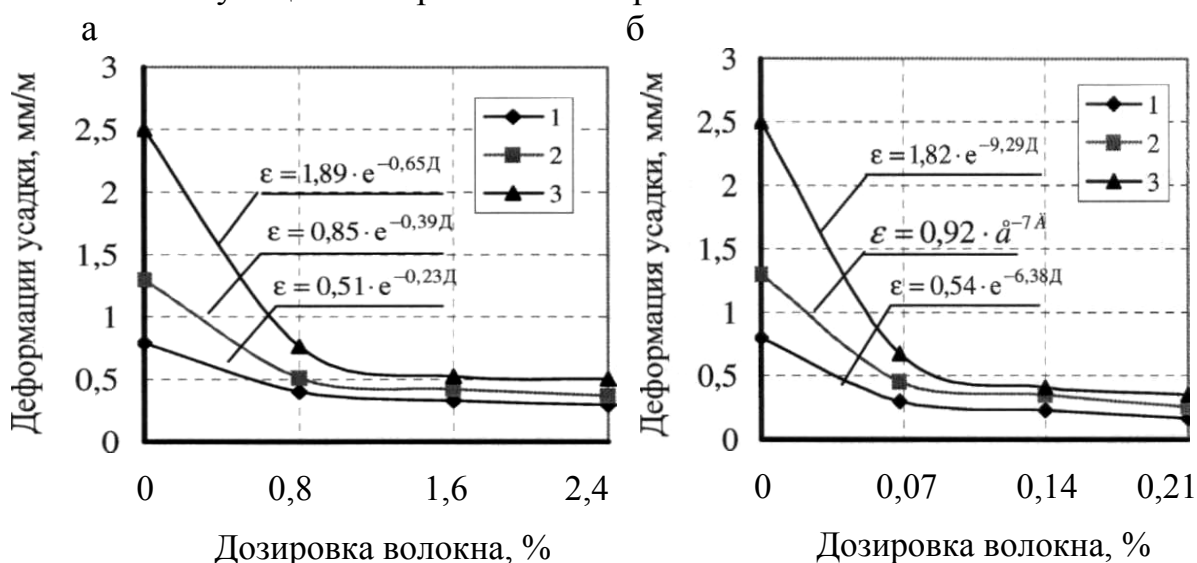


Рис. 5.4. Усадочные деформации цементного камня в зависимости от дозировки и длины волокна:
 а – длина полиамидного волокна $l = 0,8$ мм; б – то же $l = 6$ мм;
 1 – усадка при $\theta = 70-80$ %; 2 – то же при $\theta = 5-10$ %;
 3 – то же после высушивания при $t = 105$ °С

После стабилизации усадочных деформаций цементный камень с полиамидными волокнами при погружении в воду проявляет повышенную способность к набуханию, однако его усадочная деформация не превышает контрольного значения (табл. 5.3). Так, деформации набухания цементного камня, модифицированного волокном, в среднем составили 1,3 мм/м, что в 1,5 раза ниже деформаций набухания цементного камня контрольного состава.

Очевидно, что снижение деформаций усадки и увеличение набухания цементного камня с волокнами связаны с особенностями формирования структуры цементного камня.

Таблица 5.3

Усадочные деформации цементного камня с полиамидными волокнами

№ серии	Количество волокна, %	Длина волокна, мм	В/Ц	Дозировка СП SMF, %	Усадка, мм/м			Набухание, мм/м
					при $\theta=70-80$ %	при $\theta=5-10$ %	полная после высушивания при $t = 105$ °С	
1	-	-	0,250	-	0,82	1,320	2,500	2,1
2	0,8	0,8	0,180	1,0	0,40	0,510	0,764	0,9
3	1,6	0,8	0,194	1,0	0,33	0,420	0,621	1,0
4	2,4	0,8	0,196	1,0	0,30	0,370	0,477	0,7
5	0,07	6	0,196	1,0	0,30	0,460	0,570	1,5
6	0,14	6	0,199	1,0	0,23	0,366	0,430	1,9
7	0,21	6	0,199	1,0	0,17	0,260	0,390	1,7

Изучено влияние полиамидного волокна на трещиностойкость цементного камня в результате многократного циклического «насыщения в воде – высушивания». Установлено значительное повышение трещиностойкости цементного камня с введением волокна. Это подтверждается просмотром трещин на образцах цементного камня, которые для цементного состава без волокна после девяти циклов многократного циклического «насыщения в воде – высушивания» раскрылись до 2,2 мм. Ширина раскрытия трещин цементного камня составила в среднем: для волокна длиной 0,8 мм – 0,062 мм, для волокна длиной 6 мм – 0,092 мм. Увеличение длины волокна способствует росту ширины раскрытия трещин цементного камня, которое в то же время не превышает контрольного значения. Наименьшая ширина раскрытия трещин для цементного камня составов 3, 6 и 7, армированных волокном, достигает 0,8 мм и 6 мм при дозировках соответственно 1,6 % и 0,21 %. Интересно отметить, что для цементного камня указанных составов ширина раскрытия трещин 0,025-0,026 мм обнаружена после четырех циклов попеременного циклического увлажнения и высушивания.

Для контрольного состава первые трещины с шириной раскрытия 0,03-0,04 мм появились уже после первого цикла. После четвертого цикла ширина раскрытия трещин увеличилась до 0,2 мм.

Таким образом, цементный камень с волокном характеризуется значительно меньшими деформациями усадки в нормально-влажностных условиях и в условиях полной сушки при 105 °С, а также высокой трещиностойкостью в результате многократного попеременного циклического «водонасыщения в воде – высушивания».

5.3. Усадка высокопрочного бетона, модифицированного полиамидными волокнами

Модифицирование высокопрочного бетона волокнами осуществлялось на макроуровне путем наполнения его матрицы волокнами длиной $l = 6, 12$ и 18 мм, значительно превышающей их диаметр. При этом соотношение l/d изменялось от 400 до 1200. Дозировка волокна независимо от длины принималась одинаковой и составляла 0,4; 1,0 и 1,6 кг/м³. В/Ц-отношение бетона контрольного состава составляло 0,45, а пластифицированного фибробетона достигало 0,3.

Сопоставляя полученные значения усадки исследованных фибробетонов, можно констатировать, что предельные значения деформации усадки бетонов, модифицированных полиамидными волокнами, существенно ниже предельной усадки обычных бетонов контрольного состава (табл. 5.4)

Таблица 5.4

Усадочные деформации бетона с полиамидными волокнами

№ серии	Количество волокон, %	Длина волокна, мм	В/Ц	Вид и дозировка СП, %		Усадка, мм/м			Набухание, мм/м
				SMF	С-3	при $\theta = 70-80\%$	при $\theta = 5-10\%$	полная после высушивания при $t = 105^\circ\text{C}$	
1	-	-	0,45	-	-	0,50	0,90	1,75	2,2
2	0,4	6	0,30	0,48	0,32	0,13	0,28	0,90	1,8
3	1,0	6	0,30	0,48	0,32	0,12	0,25	0,50	1,2
4	1,6	6	0,30	0,48	0,32	0,10	0,24	0,40	1,4
5	0,4	12	0,30	0,48	0,32	0,16	0,30	1,00	1,7
6	1,0	12	0,30	0,48	0,32	0,14	0,30	0,76	1,1
7	1,6	12	0,30	0,48	0,32	0,13	0,20	0,70	1,2
8	0,4	18	0,30	0,48	0,32	0,15	0,30	0,90	1,4
9	1,0	18	0,30	0,48	0,32	0,14	0,20	0,40	1,3
10	1,6	18	0,30	0,48	0,32	0,13	0,18	0,30	1,4
11	1,0	6	0,30	0,48	0,32	0,08	0,14	0,38	1,0
12	1,0	12	0,30	0,48	0,32	0,10	0,23	0,47	1,2

Так, для бетона контрольного состава полные деформации после высушивания при $t = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигают 1,75 мм/м, а для фибробетона составляют: 0,4–0,9 мм/м – при длине используемого волокна $l=6$ мм и 0,3–0,9 мм/м – при $l = 18$ мм/м. Несколько бóльшие значения усадки (0,7–1,0 мм/м) получены для фибробетона с длиной волокна $l = 12$ мм. Этот факт не находит логического объяснения и может быть обусловлен ошибкой эксперимента. С увеличением концентрации волокна усадочные деформации закономерно уменьшаются независимо от длины волокна (рис. 5.5).

Обработка экспериментальных данных (см. рис. 5.5) свидетельствует о том, что полная усадка фибробетона в зависимости от дозировки волокна описывается функцией вида

$$\varepsilon = ae^{bx},$$

где x – дозировка волокна, %; a и b – эмпирические коэффициенты.

Аппроксимация экспериментальных данных, выполненная методом наименьших квадратов, показала, что экспоненциальная зависимость приобретает вид:

- для фибробетона, модифицированного волокнами $l = 6$ мм:

$\theta = 70\text{--}80\text{ } \%$

$$\varepsilon = 0,28a^{-0,74A},$$

$\theta = 5\text{--}10\text{ } \%$

$$\varepsilon = 0,53a^{-0,29A},$$

сушка при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\varepsilon = 1,503a^{-0,974A},$$

- для фибробетона, модифицированного волокнами $l = 12$ мм:

$\theta = 70\text{--}80\text{ } \%$

$$\varepsilon = 0,29a^{-0,62A},$$

$\theta = 5\text{--}10\text{ } \%$

$$\varepsilon = 0,52a^{-0,53A},$$

сушка при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\varepsilon = 1,73e^{-0,653A},$$

- для фибробетона, модифицированного волокнами $l = 18$ мм:

$\theta = 70\text{--}80\text{ } \%$

$$\varepsilon = 0,28a^{-0,6A},$$

$\theta = 5\text{--}10\text{ } \%$

$$\varepsilon = 0,71a^{-1,17A},$$

сушка при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\varepsilon = 1,57e^{-1,2A}.$$

Усадка фибробетона зависит от концентрации волокна, о чем свидетельствуют изменения показателя α в экспоненциальной зависимости. Более высокие значения указывают на значительное влияние дозировки и длины волокна на усадочные деформации. Деформации набухания фибробетона не превышают 1,2–1,4 мм/м, в то время как для бетона контрольного состава они достигают 2,2 мм/м.

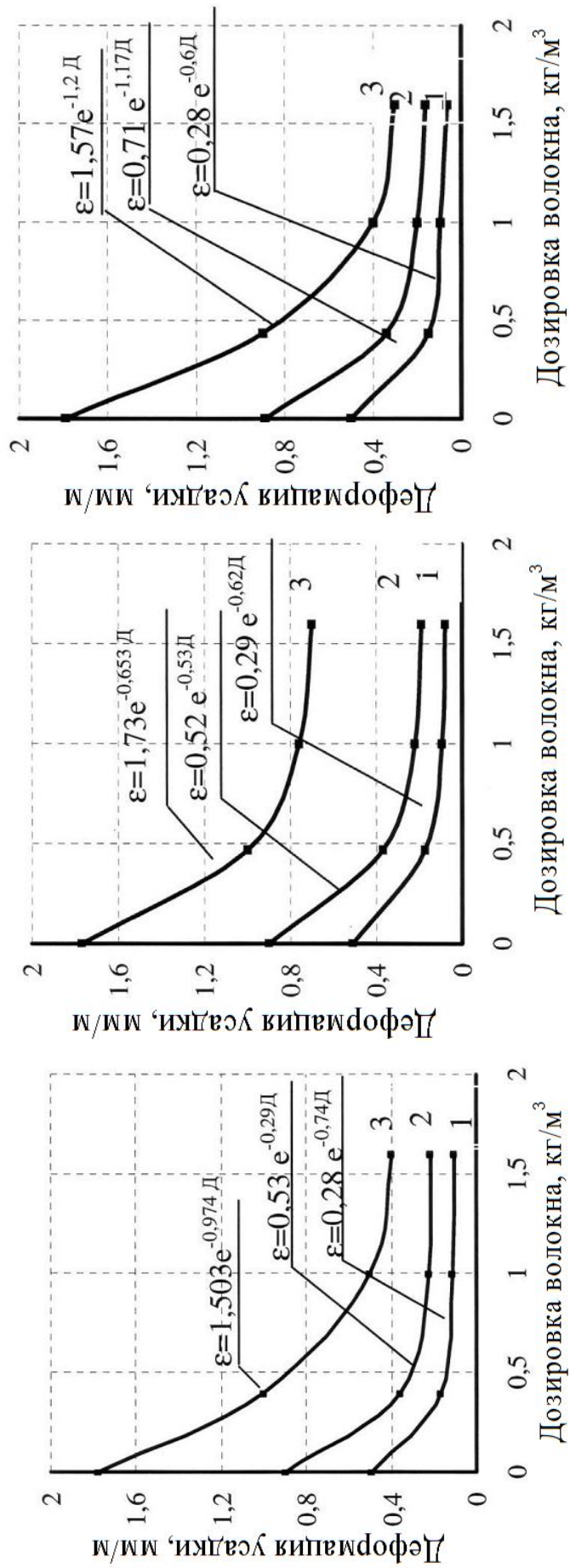


Рис 5.5. Деформации усадки бетона в зависимости от дозировки и длины волокон:

а – длина волокна $l = 6$ мм; б – то же $l = 12$ мм; в – то же $l = 18$ мм;

1 – усадка бетона при $\theta = 70-80$ %; 2 – то же при $\theta = 5-10$ %; 3 – то же после высушивания при $t = 105-110$ °С;

Выявлено снижение усадки при комплексном дисперсном двухуровневом армировании бетона на всех этапах ее измерения: в воздушно-влажностных условиях, в воздушно-сухих и при высушивании при 105 °С. Так, усадка дисперсно-армированного бетона при $\theta=70-80\%$ составила 0,08–0,1 мм/м, при $\theta=5-10\%$ – 0,14...0,23 мм/м и в условиях полной сушки – 0,38–0,47 мм/м, что соответственно уменьшило усадку на 22,5, 26,4 и 24,3% по сравнению с контрольным значением.

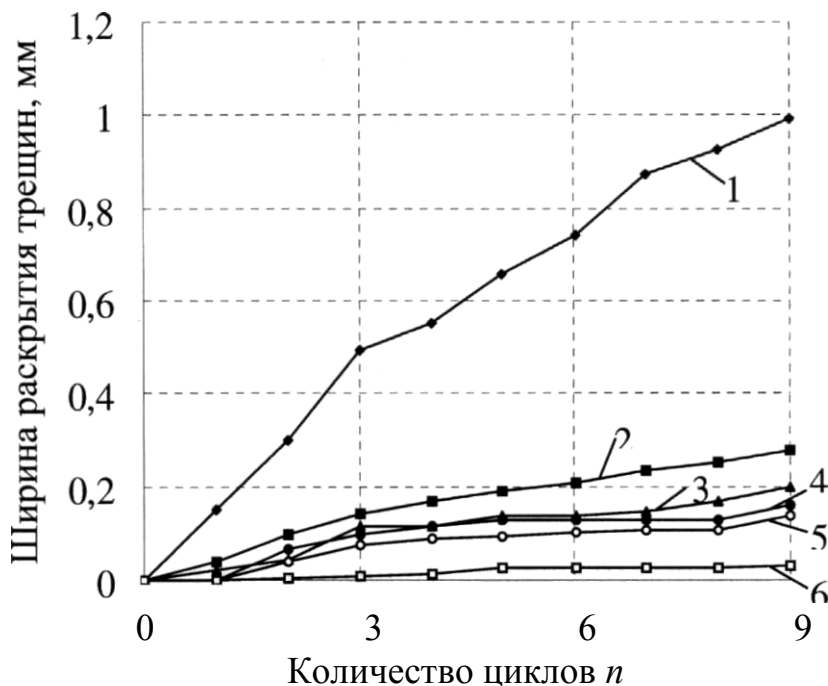


Рис. 5.6. Трещиностойкость бетона в процессе попеременного циклического увлажнения – высушивания (состав представлен в табл. 5.4)

Жесткий цикл «высушивание – насыщение в воде» является наиболее показательным для оценки трещиностойкости бетона. Это подтверждается просмотром трещин, которые на образцах бетона контрольного состава раскрылись после второго цикла до 0,1-0,15 мм, в то время как на образцах из дисперсно-армированного бетона они составили лишь 0,03 мм. А после девятого цикла ширина раскрытия трещин дисперсно-армированного бетона составила 0,08 мм, в то время как ширина раскрытия трещин армированного волокнами бетона в среднем достигала 0,23 мм, а бетон контрольного состава имел ширину раскрытия трещин 1 мм (рис.5.6).

Комплексное армирование высокопрочных бетонов позволяет существенно повысить их трещиностойкость. Таким образом, применение многоуровневого дисперсного армирования структуры бетона на микро- и макроуровнях является эффективным технологическим приемом получения бетонов с более широкими функциональными возможностями.

5.4. Влияние длины и содержания металлических волокон на прочность бетона

Цементные бетоны, обладая высокой прочностью при сжатии, имеют сравнительно низкую прочность при растяжении и изгибе. С целью исключения этого недостатка используются различные способы, одним из которых является дисперсное армирование бетона, которое рассматривается как эффективное средство повышения прочности на растяжение и снижения образования трещин на всех уровнях его структуры [32, 69].

В связи с этим на основании известных теоретических представлений об эффективном использовании армирующих добавок проводилось исследование влияния металлических волокон на свойства бетона.

Для оценки влияния длины и содержания металлических волокон на прочность бетона были изготовлены образцы-балочки 40×40×160 мм. При этом использовались волокна трёх длин: 5, 10, 15 мм. Расход материалов на 1 м³ бетонной смеси составлял: цемент – 560 кг, песок – 560 кг, щебень – 1280 кг, суперпластификатор – 1 % от массы цемента. Для приготовления опытных образцов использовались портландцемент марки ПЦ500-Д0-Н ОАО “Вольскцемент”, высокопрочный габбро-щебень фракции 5-10 мм, песок фракции 0,125-0,5 мм, суперпластификатор Melment 10 в количестве 1 % от массы цемента.

Процесс приготовления фибробетона включал две стадии. На первом этапе происходило перемешивание сухих компонентов бетона с суперпластификатором, затем – затворение водой. На втором этапе в готовую бетонную смесь вводили требуемое количество просеянной через сито фибры. Такая технология позволила исключить комкуемость волокон и обеспечить необходимую однородность фиброармированного бетона.

Данные, полученные в результате эксперимента приведены в табл. 5.5, а именно: суточная прочность на растяжение при изгибе у контрольного образца составляет 2,75 МПа, а при использовании фибры прочность бетона резко возрастает. Замечено, что при изменении дозировки волокна прочность бетона на растяжение при изгибе также увеличивается. Так, при дозировке волокна 0,3% лучшие показатели имеет бетон с волокнами длиной 15 мм – 5,2 МПа, что превышает данный показатель у контрольного образца (без волокон) на 84 %.

Бетон с волокном длиной 10 мм имеет прочность 4,64 МПа, а с волокнами 5 мм – 4,0 МПа, но и эти данные выше, чем показатели у контрольного образца, на 68 и 50 % соответственно. На рис. 5.7 изображены кривые изменения суточной прочности на растяжение при изгибе фибробетона.

Таблица 5.5

Характеристика составов и кинетика набора прочности фибробетона

№ п/п	Дозировка СП Melment 10, %	Длина волокна, мм	Дозировка волокна, %	В/Ц	Прочность $R_{изг}/R_{сж}$ в возрасте, МПа		
					1 сут	3 сут	28 сут
1	1	-	-	0,25	2,75/43,4	3,2/78,9	12,1/95,0
2	1	5	0,3	0,25	4,0/53,1	7,68/84,0	13,8/100,8
3	1	5	1,0	0,25	5,0/54,5	9,0/93,0	14,8/109
4	1	5	2,0	0,25	6,25/36,8	10,0/69,0	15,4/91,6
5	1	10	0,3	0,25	4,64/56,0	8,87/79,8	14,1/98,3
6	1	10	1,0	0,25	6,1/55,5	9,89/85,6	15,1/106,5
7	1	10	2,0	0,25	7,15/38,7	10,6/68,8	15,8/88,4
8	1	15	0,3	0,25	5,2/51,0	10,0/79,3	14,7/98,3
9	1	15	1,0	0,25	7,24/52,0	10,4/83,5	15,8/103,9
10	1	15	2,0	0,25	9,27/24,5	10,9/75,5	17,46/75,5

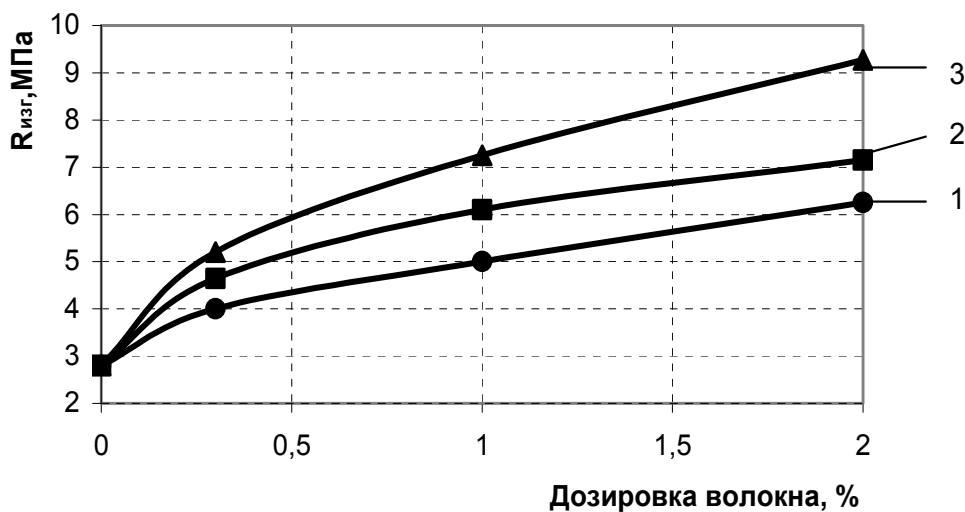


Рис. 5.7. Суточная прочность фибробетона на растяжение при изгибе в зависимости от дозировки и длины волокна:
1 – длина волокна 5 мм; 2 – то же 10 мм; 3 – то же 15 мм

Описанная выше закономерность сохранилась и при дозировках 1 % и 2 %. Так, при дозировке волокна в 1% и длине 15 мм прочность бетона равнялась 7,25 МПа, а прирост составил 160% по сравнению с контрольным составом, при длине 10 мм прочность составила 6,1 МПа, а с волокнами длиной 5 мм – 5,0 МПа. Данные показатели выше показателей контрольного образца. При максимальной дозировке волокна (2 %) были

получены самые максимальные показатели прочности на растяжение при изгибе. Значение прочности 9,27 МПа было достигнуто при длине волокон 15 мм, что превышает данный показатель у контрольного образца на 232 %. При волокне длиной 10 и 5 мм получили прочность 7,15 и 6,25 МПа соответственно.

Установленные на 1-е сутки твердения закономерности подтвердились и на 28-е сутки. На рис. 5.8 изображены характерные кривые изменения нормативной прочности на растяжение при изгибе фибробетона.

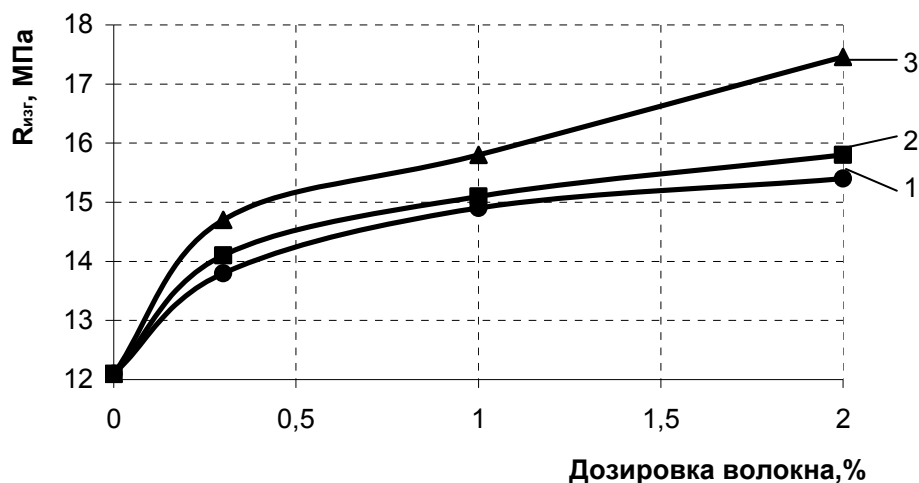


Рис.5.8. Нормативная прочность фибробетона на растяжение при изгибе в зависимости от дозировки и длины волокна:
1 – длина волокна 5 мм; 2 – то же 10 мм; 3 – то же 15мм

Контрольный образец имел прочность на растяжение при изгибе 12,1 МПа. При дозировках 0,3 %; 1 %; 2 % наибольшие прочности бетона получены при использовании фибры длиной 15 мм. Максимальное значение (17,46 МПа) достигнуто при дозировке 2 %, это на 45 % больше прочности контрольного образца. При использовании металлических волокон длиной 10 мм максимальное значение (15,8 МПа) опять пришлось на дозировку 2 %, что на 31 % выше прочности контрольного образца. С волокнами длиной 5 мм прочность на изгиб наименьшая – 15,4 МПа.

Итак, эксперимент показал, что с увеличением длины и дозировки волокна значение прочности на растяжение при изгибе возрастает. Причём, если значения прочности бетона при использовании волокон длиной 10 и 5 мм примерно равны, то при длине волокон 15 мм значение прочности выше.

Если говорить о прочности на сжатие, то там прослеживаются другие закономерности. На первые сутки твердения контрольный образец имел прочность 43,4 МПа. Наиболее характерные кривые изменения суточной прочности на сжатие фибробетона представлены на рис. 5.9.

При использовании волокна любой длины с дозировкой 2 % значение прочности ниже, чем у контрольного образца. Наибольшую прочность при данной дозировке имеет образец с волокнами 10 мм – 38,7 МПа, что на 12 % ниже прочности контрольного образца. Самая низкая прочность наблюдалась при использовании волокон длиной 15 мм – 24,5 МПа. Это значение ниже показателя прочности контрольного образца на 43 %.

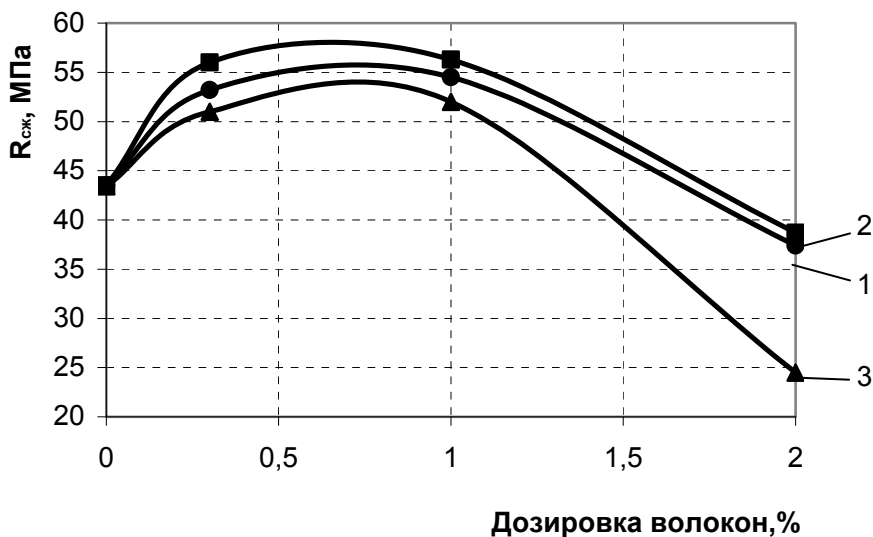


Рис. 5.9. Суточная прочность фибробетона на сжатие в зависимости от дозировки и длины волокна:
1 – длина волокна 5 мм; 2 – то же 10 мм; 3 – то же 15 мм

Если говорить о нормативной прочности на сжатие, то контрольный образец в возрасте 28 суток имел прочность на сжатие 95,0 МПа.

На рис. 5.10 представлены кривые изменения нормативной прочности высокопрочного бетона.

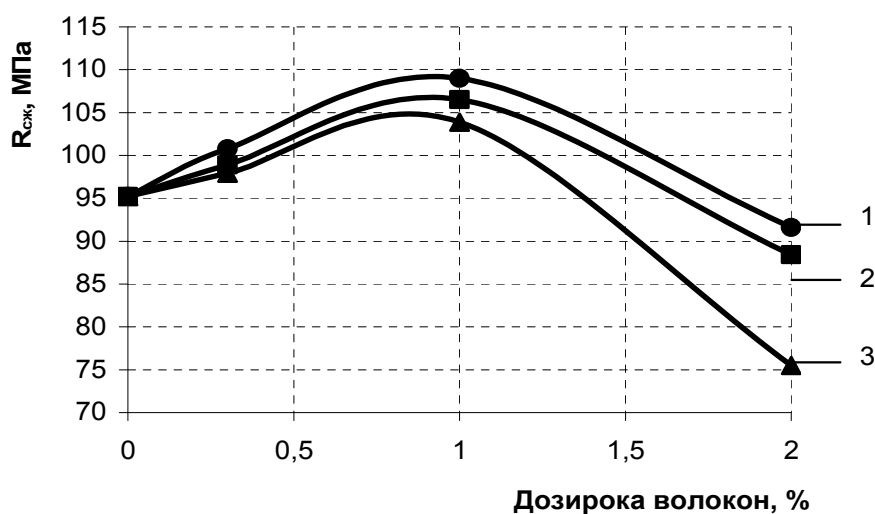


Рис. 5.10. Нормативная прочность фибробетона на сжатие в зависимости от дозировки и длины волокна:
1 – длина волокна 5 мм; 2 – то же 10 мм; 3 – то же 15 мм

Максимальные значения прочности были получены при дозировке 1 %. При длине волокон 5 мм бетон имел прочность 109 МПа, а при длине 10 и 15 мм максимальные значения прочности чуть ниже – 106,5 и 103,9 МПа соответственно.

Необходимо отметить, что при использовании волокон всех длин и дозировке 0,3 % значения прочности на сжатие у фибробетона выше, чем у контрольного образца. А при увеличении дозировки до 2 % значения прочности резко снижаются. Самые низкие значения прочности получились при дозировке волокна 2 %. Так, при длине волокон 5 мм – 91,6 МПа, при длине 10 мм – 88,0 МПа, а при 15 мм – 75,5 МПа. Данные значения ниже показателей прочности контрольного образца на 4 %, 6,5 % и 25 % соответственно.

Уменьшение прочности на сжатие при увеличении дозировки более 1 % обусловлено вероятностью переармирования бетона. Происходит разрушение бетона вследствие того, что центрами напряжений становятся сами волокна. Нарушается прочность сцепления между цементной матрицей и волокном, что также приводит к снижению прочности.

Исходя из всего вышеизложенного, можно определенно сказать, что оптимальную прочность на сжатие и растяжение при изгибе можно получить только при использовании металлического волокна длиной 10 мм и его дозировке 1 %.

5.5. Ударная вязкость высокопрочного бетона, модифицированного металлическими волокнами

Как известно, дорожные покрытия часто подвергаются динамическим воздействиям. Поэтому одним из испытаний, по которым можно судить о качестве покрытий, является испытание на ударную вязкость (сопротивление удару) [26]. Режим испытаний указывается в ГОСТах.

Для испытания высокопрочного дисперсно-армированного бетона на ударную вязкость были изготовлены образцы-кубики с ребром 5 см и высотой 5 см. В качестве армирующего элемента использовались металлические волокна длиной 5, 10 и 15 мм, а в качестве суперпластификатора – Melment 10 с дозировкой 1 %. Главной целью было изучение влияния дозировки и длины волокон на ударную вязкость бетона. Опыт проводился на копре Педжа до образования первой трещины на образце. Полученные результаты приведены в табл.5.6.

Таблица 5.6

Ударная вязкость образцов в зависимости от дозировки и длины волокна

№ п/п	Длина волокна, мм	Дозировка волокна, %	Работа, затраченная на разрушение образца, Дж/см ³
1	-	-	6,0
2	5	1,0	19,0
3	5	1,5	25,1
4	5	2,0	20,05
5	10	1,0	20,0
6	10	1,5	27,6
7	10	2,0	32,0
8	15	1,0	31,2
9	15	1,5	27,9
10	15	2,0	19,0

Из данных, приведенных в табл. 5.6, видно, что наибольшую ударную вязкость (27,6 Дж/см³) имеют образцы с длиной волокна 10 см при дозировке 1,5 %. Это значение в 5,3 раза выше данного показателя контрольного образца. При использовании фибры длиной 10 см лучший результат был получен при дозировке волокон 2 % и составил 32 Дж/см³. Наиболее характерные кривые изменения работы, затраченной на разрушение образца, приведены на рис.5.11.

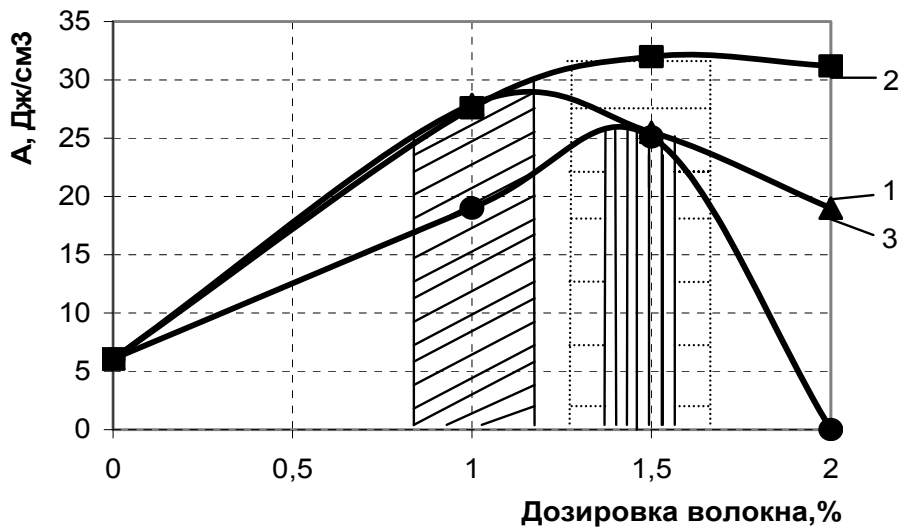

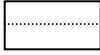



Рис.5.11. Зависимость ударной вязкости образцов от дозировки и длины фибры: 1 – 5 мм; 2 – 10 мм; 3 – 15 мм

-  – область оптимума дозировки для фибры длиной 5 мм;
-  – то же для 10 мм;
-  – то же для 15 мм

Установленные ранее закономерности подтвердились и при использовании волокон длиной 5 мм. Снова отличный результат ($25,1 \text{ Дж/см}^3$) показал образец бетона при дозировке 1,5 %, это в 4,2 превышает данный показатель контрольного образца. При дозировках 1 и 2 % были получены значения чуть ниже – 19,0 и $20,05 \text{ Дж/см}^3$ соответственно. Оптимальная дозировка приходится на область от 1,5 до 2 %.

При использовании фибры длиной 15 мм закономерность несколько изменилась. Максимальный результат ($31,2 \text{ Дж/см}^3$) пришелся на дозировку 1 %, что в 4,6 раза выше, чем ударная вязкость контрольного образца. А при дозировках 1,5 и 2 % результаты стали ниже – 27,9 и $19,0 \text{ Дж/см}^3$ соответственно. Исходя из этого, делаем вывод, что пределы оптимальной дозировки несколько изменились и составили 1,0 и 1,5 %.

Также при испытании установлено, что у образцов с фиброй длиной 5 мм ширина раскрытия трещины была больше, чем у образцов с фиброй длиной 10 и 15 мм. Это объясняется тем, что при использовании фибры большей длины происходит перекрывание волокон между собой и трещина, образуемая при этом, быстрее затухает. При использовании фибры меньшей длины трещина шире раскрывается, так как волокна не мешают ей и не задерживают ее роста. На рис. 5.12 показан характер трещинообразования фибробетонных образцов с длиной волокна 5 и 15 мм.

а



б



Рис. 5.12. Характер трещинообразования фибробетона:
а – при использовании металлических волокон длиной 5 мм;
б – при использовании металлических волокон длиной 15 мм

5.6. Усадка высокопрочного бетона, модифицированного металлическими волокнами

Для изучения влияния длины и дозировки металлических волокон на усадку высокопрочного бетона были изготовлены образцы размером 40×40×160 мм. Модифицирование бетона осуществлялось волокнами диаметром 0,45 мм и длиной 5, 10, 15 мм. Дозировка волокон составляла 1; 1,5 и 2 % к объёму. Дозировка суперпластификатора Melment-10 равнялась 1 %. В/Ц-отношение бетона контрольного состава составляло 0,41, а пластифицированного – 0,25.

Сопоставляя полученные значения усадки исследованных образцов фибробетонов, можно констатировать, что предельное значение деформации усадки бетонов, модифицированных металлическими волокнами, ниже предельной усадки немодифицированных бетонов контрольного состава. Данные, полученные в результате опыта, приведены в табл.5.7.

Таблица 5.7

Влияние дозировки и длины волокна на усадку высокопрочного бетона

№ п/п	Дозировка СП Melment 10, %	Длина волокна, мм	Дозировка волокна, %	В/Ц	Деформации усадки, мм/м
1	-	-	-	0,41	0,7075
2	1	-	-	0,25	0,6025
3	1	5	1,0	0,25	0,5000
4	1	5	1,5	0,25	0,4725
5	1	5	2,0	0,25	0,4525
6	1	10	1,0	0,25	0,4725
7	1	10	1,5	0,25	0,4500
8	1	10	2,0	0,25	0,4225
9	1	15	1,0	0,25	0,4225
10	1	15	1,5	0,25	0,3925
11	1	15	2,0	0,25	0,3750

Так, для бетона контрольного состава без суперпластификатора полная величина деформаций усадки после высушивания при 105 °С составила 0,7075 мм/м, а контрольного образца с суперпластификатором – 0,6025 мм/м. Данный факт можно объяснить тем, что применением суперпластификатора мы снизили количество воды. Если рассматривать дисперсно-армированный бетон, то величина усадки у него ниже, чем у контрольного образца с суперпластификатором. Прослеживается следующая закономерность: с увеличением длины и дозировки фибры в бетоне величина деформации усадки снижается. Наименьшую величину деформации усадки имели образцы с длиной фибры 15 мм и дозировкой 2 % – 0,3750 мм/м, это в 1,6 раза меньше, чем усадка контрольного образца. При дозировках 1 и 1,5 % усадка образцов с длиной фибры 15 мм составила

соответственно 0,4225 и 0,3925 мм/м. При использовании волокон длиной 10 мм величина полной усадки была снова наименьшей при дозировке 2 % и составила 0,4225 мм/м, это в 1,42 раза меньше, чем усадка контрольного образца. При меньшей дозировке волокон в 1 и 1,5 % усадка увеличивалась до 0,4725 и 0,4500 мм/м соответственно. Выявленные ранее закономерности полностью подтвердились и при использовании волокон длиной 5 мм. Наибольшая величина усадки наблюдалась при дозировке волокон 1 % – 0,5 мм/м, при дозировке 1,5 % она была чуть меньше – 0,4725 мм/м. Наименьшая же усадка была снова при дозировке волокон 0,4525 мм/м; это ниже, чем у контрольного образца, в 1,33 раза. Наиболее характерные кривые изменения усадки высокопрочного бетона в зависимости от дозировки и длины волокон приведены на рис.5.13.

По результатам проведённого опыта можно сделать вывод о том, что введение в высокопрочный бетон фибры снижает величину деформации усадки. В нашем случае лучший результат – снижение усадки в 1,6 раза – был получен при использовании волокон длиной 15 мм и дозировке 2 %.

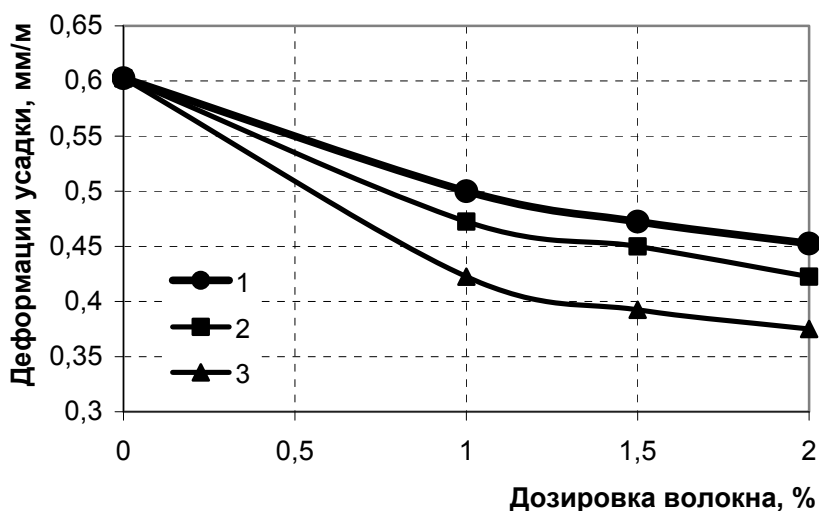


Рис.5.13. Зависимость деформаций усадки от дозировки и длины волокна:
1 – волокна длиной 5 мм; 2 – то же 10 мм; 3 – то же 15 мм

6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА ПРИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

6.1. Использование метода акустической эмиссии для оценки трещиностойкости бетонных образцов

Прочность цементного камня и бетона – это важнейший показатель их структуры, определяющий практически все остальные свойства этих материалов и, следовательно, области их применения. Формируя ту или иную структуру, изменяя ее характер и особенности, можно менять свойства бетонов в достаточно широких пределах.

Механические свойства бетона (прочность, вязкость, упругость, пластичность) определяют его способность сопротивляться деформациям и разрушению под действием разнообразных внешних сил, то есть характеризуют его надежность и долговечность как конструкционного композиционного материала.

Современные композиционные материалы подразделяются на три основных класса [1]:

- 1) дисперсно-упрочненные;
- 2) упрочненные частицами;
- 3) армированные волокнами.

Достижение высокой конструкционной прочности в композиционных материалах, армированных волокнами, обусловлено тем, что эти материалы представляют собой композицию из мягкой матрицы и высокопрочных волокон, которые армируют матрицу и воспринимают всю нагрузку. В данном случае матрица нагружена слабо и служит для передачи и распределения нагрузки между волокнами. В случае же дисперсно-упрочненных и упрочненных частицами композиционных материалов основную нагрузку воспринимает матрица, а дисперсные частицы тормозят движение дефектов структуры.

С учетом свойств компонентов бетона в нем выделяют три типа структуры: микроструктуру – структуру цементного камня, видимую при большом увеличении под микроскопом; мезоструктуру – структуру раствора в бетоне – как двухкомпонентную систему (мелкий заполнитель и цементный камень); макроструктуру – как двухкомпонентную систему (крупный заполнитель и раствор), видимую невооруженным глазом или при небольшом увеличении.

В то же время структуру цементного камня можно, по образному выражению В.Н.Юнга, квалифицировать как «микробетон», считая, однако, что «заполнителями» в нем служат непрогидратировавшие остатки цементных частиц – ядра, а «вяжущим» являются окаймляющие их значительно менее

плотные реакционные каемки, состоящие из гидратных новообразований, постепенно упрочняющихся с течением времени.

Если исходить из принятой двухкомпонентной макроструктурной модели, то важнейшими структурными элементами бетона являются цементный камень (матрица), зерно заполнителя и их сцепление. В этой связи свойства бетона определяются прочностью, деформативностью, объемом цементного камня и заполнителей. Они зависят также от геометрических и петрографических характеристик зерен заполнителей, от их сцепления с цементным камнем, от характера и числа макро- и микродефектов структуры.

Изучение и учет соответствующих характеристик структурных элементов приобретают первостепенное значение при решении задач оптимизации и прогнозирования важнейших технических свойств бетона. В основе этого изучения лежат положения физико-механической, структурной, энергетической и технологической механики материалов.

Проблеме прочности и разрушения композиционных строительных материалов (КМС) посвящены работы И.Н. Ахвердова, Л.А. Алимова, Ю.М. Баженова, В.В. Бабкова, О.Я.Берга, А.Н. Бобрышева, В.Н. Вырового, А.А. Гвоздева, Г.И. Горчакова, И.М. Грушко, Е.А. Гузеева, Ю.В. Зайцева, В.Т. Ерофеева, П.Г. Комохова, Г.Б. Муравина, Л.П. Орентлихер, В.В. Панасюка, А.П. Прошина, Р.З. Рахимова, В.П. Селяева, В.И. Соломатова, Е.М. Чернышова, В.И. Шевченко, Е.Н. Щербакова, А.Ф. Щурова и др.

Механика разрушения – это относительно новое направление в механике твердого деформируемого тела, включающее в себя как структурную, так и прикладную механику.

Прикладная механика определяет поля напряжений при вершине трещины, упругие и пластические деформации материала в окрестности трещины, а структурная механика занимается вопросами разрушения на уровне размеров атомов и дислокаций вплоть до размеров примесей и зерен. Понимание этих процессов дало бы возможность получить критерии, определяющие рост трещин и разрушение. Эти критерии предназначены для предсказания поведения трещины в заданном поле напряжений – деформаций. Ранее отмечалось, что понимание процессов разрушения дает также возможность выявить параметры материала, определяющие его трещиностойкость; эти параметры необходимо знать, если нужно получить материалы с повышенной трещиностойкостью.

Исходное положение механики разрушения заключается в том, что разрушение опытных образцов или элементов конструкций всегда есть следствие развития технологических или эксплуатационных дефектов. Учитывая влияние этих дефектов, констатируем, что механика разрушения дает возможность установить количественную связь между номинальным напряжением, формой и размером данного дефекта и сопротивлением материала разрушению. Именно в этом заключается принципиальная

основа использования данных методов испытаний при выборе материала, определении размера детали, прогнозировании надежности и долговечности [2].

Гриффитс [3] впервые предложил ввести энергетические критерии неустойчивости трещины, важность которых состоит в том, что они дают возможность установления связи между действительной прочностью, энергией, необходимой для образования новых поверхностей трещины, упругими свойствами материала и длиной трещины.

По Гриффитсу, реальная прочность образца прямоугольной полосы единичной толщины выражается уравнением следующего вида:

$$\sigma_c = (4\gamma E / \pi l)^{1/2}, \quad (6.1)$$

где γ – эффективная плотность поверхностной энергии или энергия разрушения; E – модуль упругости; l – размер щелевой трещины.

Энергия разрушения определяется либо как работа, необходимая для образования единицы новой поверхности трещины, либо как энергия, поглощенная вновь образованной поверхностью разрушения и приходящаяся на единицу площади.

Классическая концепция хрупкого разрушения по Гриффитсу касалась только хрупких и однородных материалов, другие материалы оставались вне сферы ее применимости.

Следующий этап в становлении современной механики разрушения связан с экспериментальными исследованиями Ирвина и Орована [4, 5], предложившими использовать теорию Гриффитса для квазихрупкого разрушения металлов и неметаллов, когда все необходимые процессы пластических деформаций происходят лишь в малой окрестности вблизи вершины трещины. Они показали, что, если константу поверхностной энергии материала в теории Гриффитса заменить на удельную работу пластической деформации, тогда теория Гриффитса окажется применимой для многих материалов.

В исследованиях последних лет по определению сопротивления материалов разрушению достигнут значительный прогресс благодаря разработке методов механики разрушения – нового научного направления, лежащего на стыке механики деформируемого твердого тела, материаловедения и физики разрушения. Концепция механики разрушения заключается в том, что разрушение твердого тела происходит в результате развития в нем реальных дефектов.

Поскольку между структурой и параметрами механики разрушения существует тесная физическая связь, можно найти новые, более дифференцированные и очень эффективные характеристики поведения материалов под нагрузкой; поэтому методы механики разрушения все шире начинают применять для оценки качества конструкционных материалов и оптимизации их механических свойств.

Углубление физических представлений по данным вопросам позволит не только реализовать материаловедческое обеспечение повышения качества конструкционного бетона и тем самым повысить надежность и экономическую эффективность конструкций и сооружений на его основе, но и усовершенствовать расчеты конструкций по предельным состояниям.

6.1.1. Понятие акустической эмиссии и ее основные источники

Явление акустической эмиссии (АЭ) известно давно, особенно в тех материалах, у которых частота сигналов акустической эмиссии располагается в звуковом спектре и имеет достаточную интенсивность (дерево, стекло и др.). Однако его практическое использование долгое время ограничивалось слуховым контролем процесса охлаждения керамических изделий [6], предупреждением завалов в шахтах и т.д. Только в начале 1950-х годов И. Кайзер приступил к подробному изучению акустической эмиссии в металлах (им было обнаружено так называемое явление Кайзера). Далее это явление изучал Скофилд, который установил два вида акустической эмиссии: непрерывную и импульсную. В результате проведенных исследований была обнаружена связь параметров сигналов акустической эмиссии с развитием структурных дефектов и разрушением материалов. Так были созданы основы для разработки практических методов неразрушающего контроля качества материалов и конструкций с помощью изучения акустической эмиссии.

Опыт применения метода акустической эмиссии в различных областях промышленности для контроля объектов и технологических процессов свидетельствует в ряде случаев о преимуществах этого метода.

Рассмотрим динамические процессы, происходящие в нагруженном твердом теле. Предполагаем медленное нагружение, т.е. случай, когда скорость нагружения значительно меньше скорости звука в материале объекта. Именно медленное квазистатическое нагружение характерно для многих случаев, где успешно применяется метод АЭ. При медленном нагружении в твердом теле постепенно возрастают механические напряжения, решетка твердого тела накапливает упругую потенциальную энергию. Поскольку в большинстве случаев нагружаемые объекты неоднородны по своим физико-механическим свойствам, в некоторой области твердого тела локальные напряжения достигают в определенный момент предельного значения, и происходит разрыв внутренних связей кристаллической решетки. В этот момент быстро выделяется часть упругой энергии, накопленной ранее, определенная доля энергии расходуется на быстрое перемещение частиц в локальной зоне, где возникло нарушение связи. Происходит излучение упругой волны, а напряжения, сконцентрированные в зоне неоднородности, релаксируют.

Таким образом, возбуждение упругих волн в рассматриваемом процессе возможно только в случае достижения критических значений действующих сил (независимо от их природы), когда сумма действующих сил достигает величины силы разрыва атомных связей. Неоднородностями твердого тела, которые могут служить источниками АЭ при нагружении, являются все типы дефектов кристаллической решетки [7].

Следовательно, условия, характерные для возникновения акустической эмиссии, в ряде случаев определяются медленным изменением и затем быстрым релаксационным изменением напряженно-деформированного состояния, во время которого излучаются упругие волны.

Рассмотрим некоторые модели источников АЭ. На рис. 6.1, а-в приведены известные модели образования микротрещин из дислокационных скоплений, а на рис. 6.1, г – схема роста трещины путем слияния ее с полостью, образующейся перед кончиком трещины.

Дислокации, на которые действуют возрастающие напряжения, перемещаются по линии скольжения и останавливаются каким-либо препятствием – границей зерна (см.рис. 6.1, а, б), включением (см.рис. 6.1, в) и т.п. При дальнейшем повышении напряжений либо дислокации прорвут препятствие и произойдет быстрое перемещение их в теле зерна, либо перед препятствием (см.рис. 6.1, а) или за ним (см. рис. 6.1, б) образуются микротрещины, либо часть дислокаций «переползет» с линии скольжения, что снизит локальные напряжения.

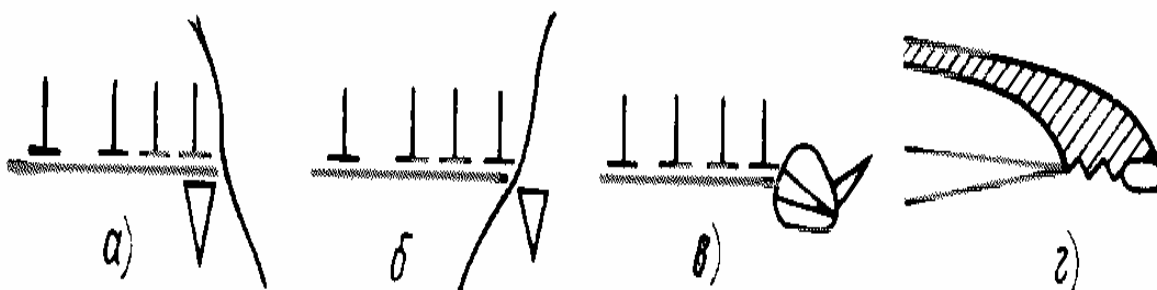


Рис. 6.1. Модели образования и роста микротрещин

Энергию упругих колебаний, которая выделяется при образовании микротрещины из скопления дислокаций, можно оценить следующим образом. При увеличении приложенной нагрузки атомы кристаллической решетки удаляются друг от друга, запасая упругую потенциальную энергию, пропорциональную работе приложенной силы σ , на пути, равном деформации ε . Для единичного объема материала упругая энергия составит:

$$W = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon. \quad (6.2)$$

Учитывая, что

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (6.3)$$

получим:

$$W = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E}. \quad (6.4)$$

Разрыв атомных связей произойдет в тот момент, когда действующее напряжение достигнет теоретической прочности для данного материала. По приближенным оценкам, она составляет $\sigma_{\max} = E/5$. Накопленная энергия деформации при образовании разрыва распределится между энергией, необходимой для образования поверхности микротрещины γ , и энергией АЭ; поэтому

$$W_{\text{АЭ}} = W - \gamma. \quad (6.5)$$

Для оценки энергии АЭ необходимо знать поверхностную энергию для данного материала. Приблизительно она составляет $\gamma \approx Eb/50$ (где b – постоянная решетки). Будем считать, что объем образовавшейся микротрещины приблизительно равен объему неоднородности, тогда

$$W_{\text{АЭ}} = \frac{1}{2} \frac{E}{25} hl(nb) - \frac{Eb}{50} hl, \quad (6.6)$$

где h – глубина микротрещины; l – длина микротрещины; n – число дислокаций, которые положили начало образованию микротрещины.

При достаточно большом n поверхностная энергия по сравнению с энергией АЭ не превышает 1 % суммарной накопленной энергии.

Представленная оценка справедлива для любой модели образования микротрещины.

Таким образом, акустическую эмиссию могут вызывать такие внутренние по отношению к рассматриваемому материалу источники, как подвергаемые изменению (перестройке) элементы структуры материала в случае локального изменения внутренних напряжений в материале при достаточно высокой скорости этого изменения.

Перечисленные далее механизмы позволят понять причины возникновения акустической эмиссии.

Скольжение. Оно является одним из основных механизмов необратимого формоизменения материалов и обусловлено движением дислокаций. Наличие локальных полей напряжений вокруг дислокации при достаточно высокой скорости ее движения создает необходимые условия возникновения акустической эмиссии. Коттрел [8] объясняет процесс возникновения механических волн в этом случае следующим образом. В структурах с плотной упаковкой атомов нарушения правильности их расположения создают у центра дислокации менее плотную упаковку, т. е. происходит увеличение удельного объема в этой части тела. Размеры и форма этой зоны расширения при движении дислокации со скоростью V меняется с частотой

$$\nu = \frac{V}{b}, \quad (6.7)$$

где b – параметр решетки в направлении движения дислокации. В окружающую решетку от этой зоны распространяются волны с частотой ν .

Описание движения дислокации в рамках теории упругости показывает, что в случае изменения формы или скорости дислокации она излучает в окружающую среду упругую волну. Точный анализ этих волн затруднителен, да и вряд ли целесообразен, поскольку они обладают низкой энергией и сильно затухают в реальном материале из-за высокой частоты (оценка по формуле (6.7) дает очень высокие частоты даже при умеренных скоростях V).

Более высокую энергию упругих волн обеспечивает движение скопления дислокаций. При движении дислокаций происходит их местная задержка у различных препятствий. Преодоление их приводит к быстрым местным сдвигам. Для некоторых материалов лавина сдвигов вызывает увеличение абсолютной деформации на 10^{-2} – 10^{-4} мм за 10^{-1} – 10^{-2} с. С феноменологической точки зрения это выражается в скачкообразности диаграммы упрочения (эффект Портевена – Ле-Шателье). Накопленная при этом энергия освобождается в виде волн (происходит динамическое перераспределение напряжений, что и порождает волны) [9, 10].

Двойникование. Оно представляет собой, как известно, поворот узлов решетки одной части кристалла в положение, симметричное другой его части. Двойникование сопровождается локальным формоизменением и происходит с большей (околозвуковой) скоростью, тем самым выполняются основные условия возбуждения механических волн [9].

Фазовые превращения. Фазовые превращения мартенситного типа представляют собой сдвиговые коллективные перемещения атомов и, как правило, сопровождаются изменением формы. При превращении образуются (исчезают) частицы новой фазы за 0,05–0,5 мкс. При возникновении (исчезновении) таких частиц в них и окружающей среде развиваются дилатационные и сдвиговые компоненты смещения, что вызывает появление механических волн.

Образование трещин. С дислокационных воззрений образование и развитие трещин обусловлены движением дислокаций; поэтому растущая трещина должна рождать акустическую эмиссию. С феноменологических позиций излучения механических волн быстро развивающейся трещиной можно объяснить динамической разгрузкой части материала, примыкающего к берегам образующейся трещины. К этому же эффекту приводит и скачкообразность развития в целом медленно развивающейся трещины. В.М. Финкель [11] отмечает, что причиной излучения механических волн развивающейся трещиной являются пульсации ее скорости и изменения направления, т. е. акустическую эмиссию вызывает, в частности, ветвление трещины.

Развитие трещины в реальных конструкционных материалах связано с пластической деформацией материала в районе ее вершины; поэтому

акустическая эмиссия возникает вследствие действия таких источников, как скольжение и двойникование.

Процессы трения. Как известно, при сухом трении твердых тел происходят пластические деформации вершин микрон неоднородностей поверхности, а также «слипание» тел на участках истинного контакта, где действуют силы молекулярного сцепления. При взаимном скольжении тел происходят разрыв старых и образование новых участков контакта. Сухое трение может сопровождаться образованием микротрещин на поверхности, подвергаемой трению. Все эти процессы способны, очевидно, возбуждать механические волны. Подобные процессы могут возникать и во внутренних объемах материала, тогда вызванные ими механические волны следует относить к акустической эмиссии. Кайзер считал процессы трения поверхностей разрыва, образующихся внутри материала при деформировании, одним из основных источников акустической эмиссии. Типичным действием такого механизма является работа материала с усталостной трещиной при циклическом нагружении. Общеизвестный характер усталостного излома показывает, что процесс периодического раскрытия и схлопывания трещины сопровождается трением и притиркой ее поверхности.

Все эти признаки, позволяют сформулировать понятие акустической эмиссии следующим образом. *Акустическая эмиссия – процесс излучения материалом механических волн, вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала.*

Учитывая сложность структуры бетона, нужно прежде всего измерять и регистрировать так называемую импульсную ("щеточную") акустическую эмиссию, т.е. наблюдать за низкочастотными составляющими сигналов акустической эмиссии, источниками которых являются разрывающиеся микро- и макротрещины. Высокочастотные составляющие сигналов акустической эмиссии (непрерывная эмиссия), источником которых является перестройка структуры материала на микроуровне (движение дислокаций, их накопление, вакансии кристаллической решетки, двойникование и др.), не определяют поведение тех строительных материалов, которые содержат зародышные микротрещины и поры, возникшие под влиянием температурных и влажностных факторов, зависящих от особенностей технологии их производства. Микро- и макродефекты нужно идентифицировать с неоднородностью структуры материала, они влияют на характер деформирования поля напряжений, а также на общую прочность и процесс разрушения материала при его нагружении. При увеличении напряжений в твердых телах происходит разрушение атомных связей именно в зоне неоднородностей.

6.1.2. Акустическая эмиссия в телах с дефектами

Главная характерная особенность тел с дефектами заключена в том, что в дефектах концентрируются напряжения при нагружении тела. Так, напряжения в зоне круглого выреза в пластине превышают среднее напряжение в пластине. Поэтому при нагружении тела с дефектами в зоне концентраторов в первую очередь происходят пластическая деформация, деформационное упрочнение и, наконец, разрушение [12].

Принципиально новые возможности исследования роста трещины представляются при использовании АЭ в механике разрушения. Х. Данеган [13] с сотрудниками высказал предположение о связи параметров АЭ с коэффициентом интенсивности напряжений K . Данный коэффициент характеризует напряжения вблизи кончика трещины. Он зависит от геометрии объекта, размера, формы и положения трещины.

Связь коэффициента интенсивности напряжений с числом импульсов АЭ при росте трещины основана на следующих предпосылках. Рост нагрузки на объекте с трещиной увеличивает действующее общее напряжение и, в особенности, локальное напряжение на кончике трещины. Локальное напряжение в конце концов достигает предела текучести материала. Впереди фронта трещины образуется зона пластической деформации, изменение объема которой определяется изменением коэффициента интенсивности напряжений. Число импульсов АЭ пропорционально числу элементарных источников в пластически деформируемом объеме, размер которого определяется коэффициентом интенсивности напряжений. Приведенные рассуждения позволили получить зависимость между коэффициентом интенсивности напряжений K и числом импульсов АЭ при развитии трещины:

$$N = a K^m, \quad (6.9)$$

где a и m – параметры, зависящие от материала, его состояния, условий роста трещины; для различных материалов и условий испытаний $m = 4 - 12$.

Если мы рассматриваем тонкую пластину с трещиной длиной $2l$, то коэффициент интенсивности напряжений при однородном растягивающем напряжении σ будет

$$K = \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (6.10)$$

и при $m = 4$

$$N = a \sigma^4 \pi^2 l^2, \quad (6.11)$$

т.е. измерение числа импульсов АЭ дает информацию о росте трещины.

На рис. 6.2 приведены амплитудные распределения для двух образцов, в одном из которых происходит хрупкое разрушение (верхнее распределение), в другом – рост вязкой трещины. Два процесса – пластическая деформация и рост трещин – различаются по амплитудным распределе-

ниям сигналов АЭ. Это ясно уже из общих соображений. Пластическая деформация происходит в достаточно больших объёмах относительно малыми скачками, обусловленными малыми по масштабу всего объекта единичными и деформационными ступенями. При тех же энергетических вложениях трещины продвигаются скачками, что также отражается на параметрах АЭ. При разрушении путем роста трещины акты АЭ имеют большие амплитуды и следуют реже, чем при пластической деформации.

Однако в каждом конкретном случае необходимо устанавливать количественные соотношения, разделяющие параметры АЭ при пластической деформации и росте трещины. Дело в том, что и пластическая деформация сопровождается большими по амплитуде импульсами АЭ, например при двойниковании, а рост трещины в случае вязкого разрушения сопровождается большой пластической деформацией.

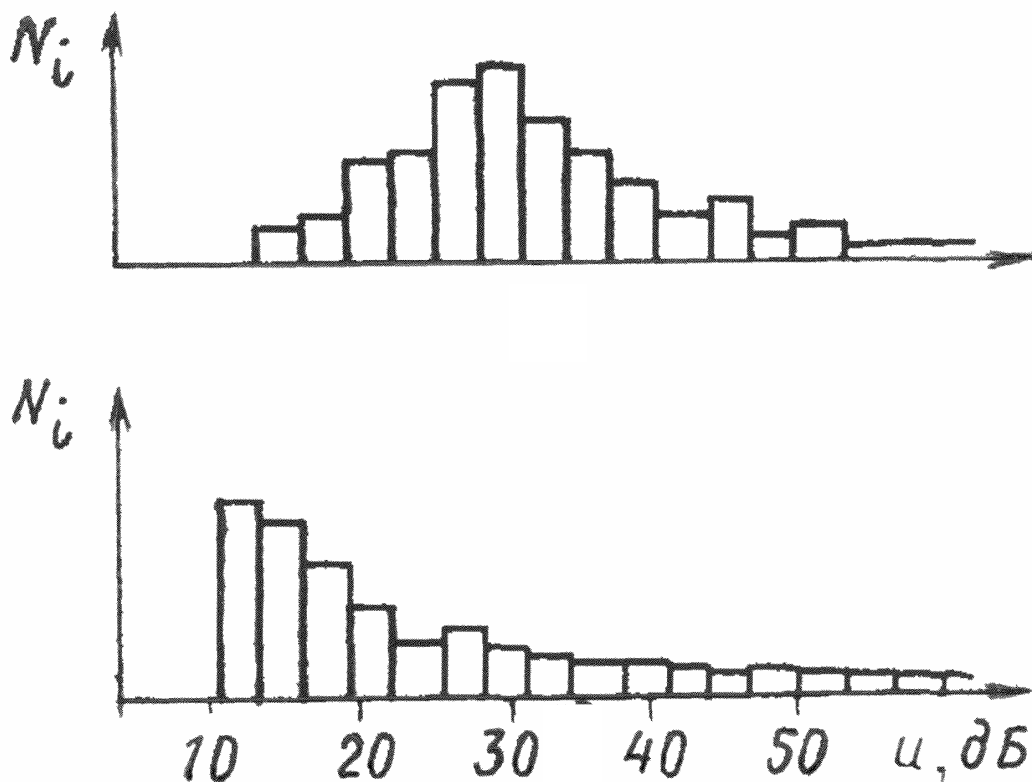


Рис. 6.2 Амплитудное распределение импульсов АЭ при различных типах разрушения

Установлено также [13], что показатель степени коэффициента интенсивности напряжений в уравнении (6.9) для испытываемых образцов лежал в диапазоне 3–20. Нижние значения показателя соответствовали образцам, разрушившимся вязко, верхние — хрупко. Это объясняется тем, что уравнение (6.8) получено только с учетом АЭ, возникающей в результате образования пластически деформированной зоны на кончике трещины.

Разрушение, сопровождающееся деформацией двойникованием, а также хрупкое разрушение дают показатели степени в (6.9), превышающие 4.

Характерной особенностью АЭ при циклическом нагружении является быстрое уменьшение числа импульсов АЭ и их амплитуд при нагружениях повторных после первого. Этот эффект носит название эффекта Кайзера, по имени первого его исследователя. В настоящее время он формулируется как явление невоспроизводимости АЭ при повторном нагружении, вплоть до максимальной нагрузки предшествующего нагружения [14, 15].

Абсолютное исчезновение АЭ при повторном нагружении должно свидетельствовать о том, что материал не повреждается и, следовательно, усталостного разрушения не будет при любом числе циклов нагружения. Если же при повторных нагружениях значения параметров АЭ уменьшаются в малой степени, то, следовательно, идет быстрое накопление повреждений и, соответственно, быстрое усталостное разрушение объекта.

Типичная кривая числа импульсов АЭ при малоцикловой усталости приведена на рис. 6.3. Эта кривая получена при испытании на изгиб образцов из конструкционной стали с надрезом. Сечение образца 20×40 мм, длина 300 мм, глубина надреза 5 мм. Максимальная нагрузка в цикле 50 кН. В первом цикле нагружения происходит интенсивное пластическое деформирование материала в кончике надреза и соответственно излучается большое число импульсов АЭ с достаточной для регистрации амплитудой. В каждом последующем нагружении число импульсов снижается на порядок (участок *AB*). Далее повреждения медленно накапливаются (участок *BC*). Энергия сигналов АЭ настолько мала, что они не регистрируются аппаратурой. Однако в определенных этапах роста усталостной трещины в объекте происходят перераспределение напряжений и ускоренный рост трещины (участок *CD*).

В описываемом образце ускоренный рост трещины произошел в районе 180–220 циклов. К этому периоду можно отнести образование макроскопической трещины из микроскопической. Визуально макроскопическая трещина была обнаружена только через несколько десятков циклов после того, как она была зарегистрирована прибором АЭ. Вслед за образованием макроскопической трещины началось ее медленное развитие (участок *DE*). Этому периоду соответствуют импульсы АЭ, малые по амплитуде и часто не регистрируемые аппаратурой АЭ. После роста усталостной трещины до определенного размера происходит интенсивное пластическое разрушение, сопровождаемое активным излучением упругих волн. Этому участку роста трещины соответствует участок *EF* на кривой АЭ с показателем степени, равным четырем и больше. Данная стадия роста трещины заканчивается либо прорастанием трещины на всю толщину объекта, либо хрупким разрушением после достижения трещиной критического размера. В любом случае по отме-

ченному участку EF на кривой АЭ можно судить о приближающемся катастрофическом разрушении или отказе в работе объекта.

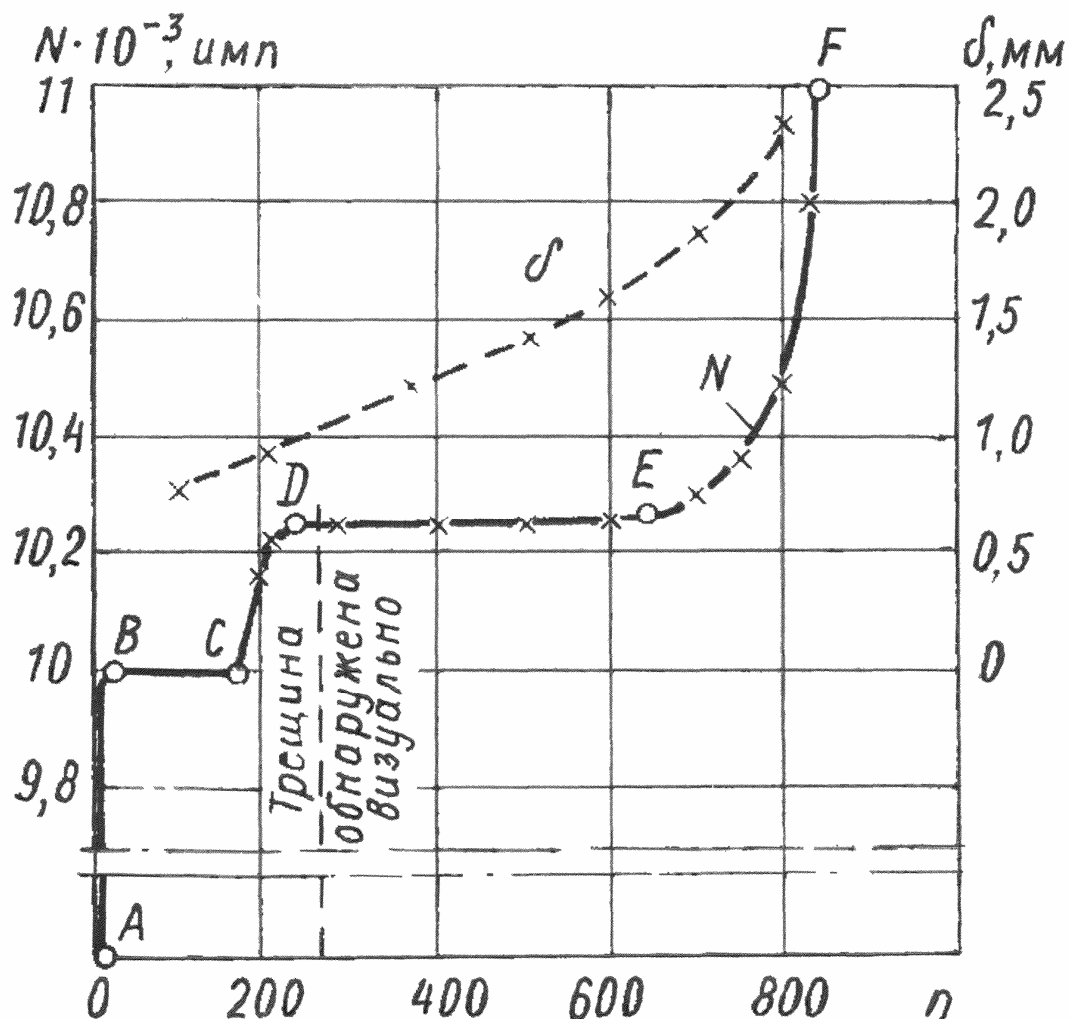


Рис. 6.3. Зависимость числа импульсов акустической эмиссии N и величины раскрытия δ трещины от числа циклов нагружения n

При усталостных испытаниях с применением АЭ в ряде случаев можно отметить характерное явление, связанное с закономерностью разрушения при циклических нагружениях. На рис. 6.4 представлено распределение числа импульсов АЭ по нагрузке в цикле за достаточно большое число циклов. Здесь следует обратить внимание на то, что упругие волны излучаются не при максимальной нагрузке в цикле, а при определенной нагрузке для данного материала и условий испытаний. Это можно объяснить следующим. При циклическом нагружении на кончике трещины происходят пластическая деформация материала и его упрочнение. То, что упругие волны излучаются при определенном уровне нагружения в цикле, свидетельствует о том, что в этот момент происходит рост трещины. При дальнейшем увеличении нагружения, вплоть до максимума, в цикле пластическая деформация новых участков материала оказывается впереди кончика продвинувшейся на величину скачка трещины. В процессе

пластической деформации в данном случае излучаются волны небольшой амплитуды, не регистрируемые аппаратурой АЭ. Это объясняется небольшой величиной роста пластически деформирующегося объема.

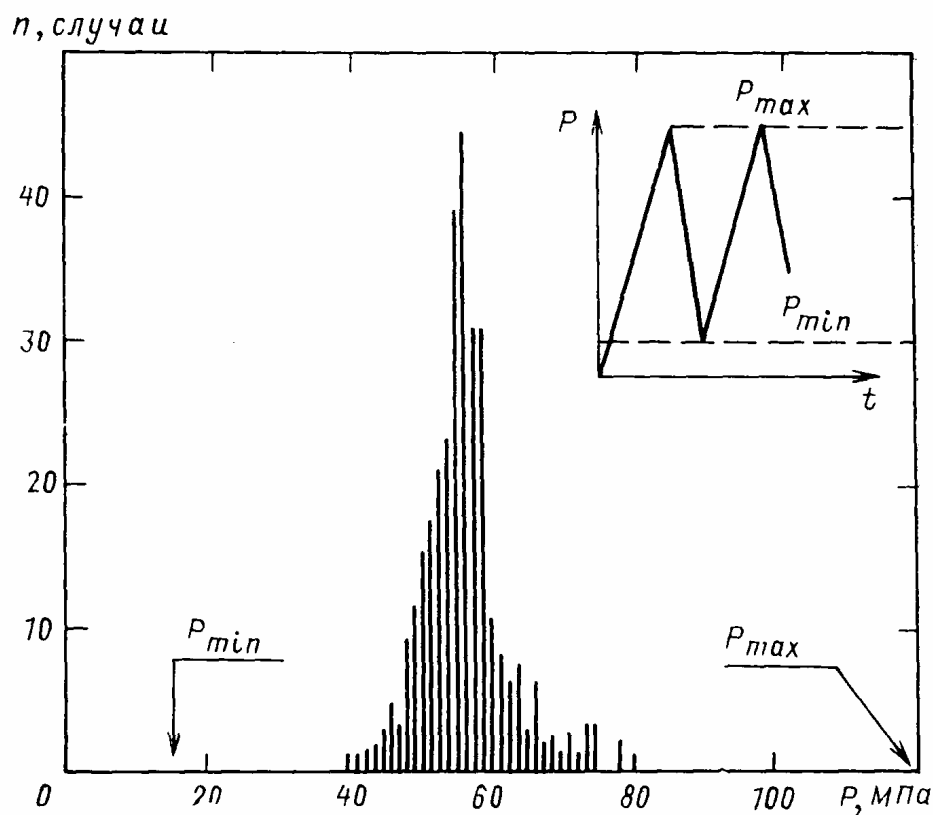


Рис. 6.4. Распределение числа импульсов АЭ по нагрузкам при циклических нагружениях образца с дефектами

Таким образом, при промежуточном значении нагрузки в цикле отмечается рост трещины; при дальнейшем увеличении нагрузки, вплоть до максимума, в цикле происходит пластическое деформирование небольшого объема на кончике трещины. Естественно, что, если нагружение продолжать после превышения максимального значения в цикле, произойдет значительная пластическая деформация, и объект будет разрушаться, как и при статическом нагружении.

При многоцикловой усталости уровень нагружения невелик, накопление повреждений в цикле незначительно, и, соответственно, амплитуда АЭ мала. В связи с этим при контроле многоцикловой усталости необходимо особое внимание обращать на уменьшение шумов оборудования и тепловых шумов аппаратуры контроля. Одним из действенных методов уменьшения шумов при усталостных испытаниях является стробирование сигналов по циклу нагружения.

Однако выяснилось, что для бетонов явление Кайзера наблюдается только на первой стадии деформирования (упругая стадия). Возникающие в бетоне нарушения структуры приводят к появлению сложных импульсов АЭ.

Обнаружение явления Кайзера в значительной степени зависит от однородности бетона в образцах, чувствительности измерительного тракта и правильности выбора дискриминационного уровня счетчика импульсов [16].

Трещиностойкость бетонных опытных образцов оценивалась по вязкости разрушения при неравновесных механических испытаниях в соответствии с рекомендациями ГОСТ 29167-91 с помощью метода акустической эмиссии (АЭ), методика которого изложена в разд. 2. С этой целью на образцах делали искусственный надрез глубиной 13 мм с помощью алмазной фрезы толщиной 1 мм. Составы фибробетона приведены в табл. 5.2.

Применение метода АЭ позволяет в реальном масштабе времени оценить интенсивность сигналов и энергию импульсов АЭ. В качестве информативных характеристик АЭ при изучении трещиностойкости приняты следующие параметры: суммарный счет импульсов и суммарная энергия АЭ, критический коэффициент интенсивности напряжения, энергия разрушения (табл. 6.1).

Т а б л и ц а 6.1

Энергетические характеристики бетона

№ п/п	Нагрузка P , кН	Прогиб V , мм	Энергетические характеристики разрушения		
			K_c^* , МПа·м ^{0,5}	A , Н·м	G_{if} , Дж/м ²
1	1,75	0,79	1,25	138,3	1257,0
2	2,75	0,71	1,96	195,3	1775,0
3	2,53	0,86	1,80	217,6	1978,0
4	2,50	0,84	1,78	210,0	1909,0
5	2,00	0,77	1,43	154,0	1400,0
6	2,50	0,84	1,78	210,0	1909,0
7	1,70	0,57	1,21	96,9	880,9
8	2,10	0,74	1,50	155,4	1413,0
9	1,60	0,70	1Д4	112,0	1018,0
10	1,60	0,59	1,14	94,4	858,2
11	2,76	0,80	1,57	147,4	1340,0
12	2,20	0,67	1,97	228,0	2007,0

П р и м е ч а н и е . Номера составов приняты в соответствии с табл. 5.2.

Из представленных результатов исследований акустической эмиссии опытных образцов высокопрочного фибробетона следует, что дисперсное армирование бетона полиамидными волокнами значительно увеличивает трещиностойкость бетона по сравнению с бетоном контрольного состава. Об этом свидетельствует уменьшение суммарного числа акустических импульсов энергии АЭ (табл. 6.2).

Таблица 6.2

Показатели суммарной энергии АЭ в зависимости
от уровней нагружения бетона

№ п/п	Суммарная энергия АЭ, В ² ·см ⁻² , в зависимости от уровня нагружения				
	$\sigma/R = 0,2$	$\sigma/R = 0,4$	$\sigma/R = 0,6$	$\sigma/R = 0,8$	$\sigma/R = 0,97$
1	0,035	0,074	0,09	0,133	0,240
2	0,013	0,030	0,060	0,070	0,080
3	0,010	0,015	0,055	0,073	0,110
4	0,039	0,070	0,106	0,142	0,180
5	0,019	0,050	0,085	0,120	0,140
6	0,027	0,059	0,097	0,109	0,185
7	0,006	0,012	0,014	0,015	0,016
8	0,017	0,044	0,066	0,097	0,126
9	0,030	0,066	0,105	0,155	0,186
10	0,008	0,012	0,016	0,160	0,161
11	0,033	0,042	0,061	0,079	0,146
12	0,013	0,030	0,069	0,185	0,227

Примечание. Номера составов приняты в соответствии с табл. 5.2.

Суммарная плотность энергии АЭ для бетона, армированного волокнами, составляет 0,08-0,14 В²·см⁻², а для контрольного бетона без волокон достигает 0,24 В²·см⁻². Графически зависимости энерговыделения АЭ бетона, армированного волокнами длиной 6, 12 и 18 мм, представлены на рис. 6.5.

Из анализа графических зависимостей (см. рис. 6.5), полученных при неравновесных механических испытаниях образцов, видно, что каждому этапу напряжения соответствует определенное акустическое излучение.

По характерному наклону графических зависимостей энерговыделения АЭ и приращению энергии АЭ при выдержке на каждой ступени нагружения можно выделить три стадии эмиссионной активности бетона, соответствующие уровням нагружения: первая – 0,1-0,2 R_н, вторая – от 0,1-0,2 R_н до 0,8-0,9 R_н и третья – 0,95-0,97 R_н. Энергия АЭ на этапах нагружения возрастает с увеличением нагрузки и достигает максимума в момент разрушения.

Приведенные графические зависимости энерговыделения АЭ дают наглядное представление о росте и зарождении дефектов структуры. Увеличение числа акустических импульсов энергии АЭ на первых этапах носит случайный характер и вызвано развитием отдельных дефектов, размер которых не является критическим для опытного образца. Переход от второй к третьей стадии акустической активности характеризует наиболее важную смену закономерности наблюдаемого параметра АЭ. Эти узловыe участки на кривой энерговыделения АЭ характеризуют переход от стабильного

роста дефекта к нестабильному, когда ускоренный рост дефекта протекает еще вязким образом.

Закритическая стадия, которая не показана на рис. 6.5, отражает хрупкое разрушение опытных образцов, сопровождающееся сильным звуковым ударом. Таким образом, смена закономерностей энерговыделения АЭ на кривой нагружения является важным прогностическим признаком разрушения.

Зависимости энерговыделения свидетельствуют о пластическом характере разрушения бетонов с полиамидными волокнами, что находится в полном соответствии с численными значениями силового критерия трещиностойкости K_c^* (рис. 6.6), критическое значение которого дает количественную характеристику сопротивления бетона разрушению. Критический коэффициент интенсивности напряжения K_c^* , как следует из рис. 6.6, для высокопрочного бетона, армированного волокнами 6 и 12 мм, достигает максимального значения 1,9 МПа·м^{0,5} и 1,7 МПа·м^{0,5} соответственно, что свидетельствует о высокой трещиностойкости фибробетона. Оптимальная концентрация волокна, обеспечивающая максимальное значение K_c^* , находится в пределах 0,4–1,0 кг/м³. С увеличением концентрации волокна свыше 1,0 кг/м³ коэффициент K_c^* уменьшается в среднем на 1,5 % по отношению к контрольному значению, что свидетельствует о значительной трещиностойкости фибробетона.

Заключительным этапом исследований явилась оценка комплексного влияния дисперсного армирования высокопрочного фибробетона на двух уровнях:

- 1) микроуровне (уровне цементного камня) – ультрадисперсным наполнителем – автоклавированным отходом («бой» силикатного кирпича);
- 2) макроуровне (уровне бетона) – полиамидными волокнами.

При этом содержание «боя» силикатного кирпича принималось 77 кг/м³, а СП С-3 в комплексной ОМД достигало 1,0 % от расхода цемента. Дозировка полиамидного волокна составила 1,0 кг/м³.

Из представленных результатов исследований акустической эмиссии опытных образцов высокопрочного фибробетона (см. табл. 6.1, 6.2) следует, что дисперсное армирование бетона полиамидными волокнами значительно увеличивает трещиностойкость бетона по сравнению с бетоном контрольного состава. Для дисперсно-армированного бетона критический коэффициент интенсивности напряжения составляет $K_c^* = 1,97$ кг/м, а суммарная плотность энергии АЭ – 0,22 В²·см⁻².

Наиболее характерные зависимости амплитудно-энергетического распределения для комплексного дисперсно-армированного бетона и бетона контрольного состава представлены на рис. 6.7.

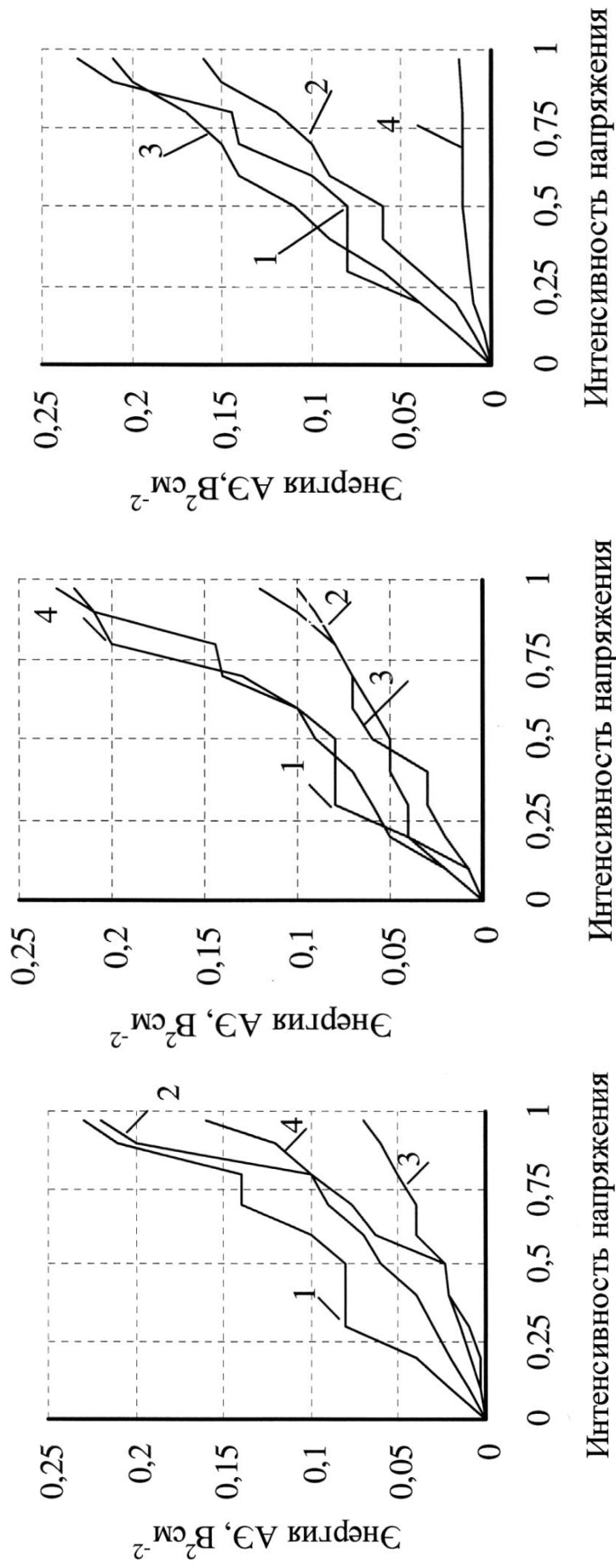


Рис 6.5. Зависимость энерговыделения акустической эмиссии бетона от уровня напряжения при изгибе:

а – длина полиамидного волокна 6 мм; б – то же 12 мм; в – то же 18 мм;
 1 – бетон контрольный без волокна; 2 – бетон с волокнами при дозировке – 0,4 кг/м³; 3 – то же 1 кг/м³; 4 – то же 1,6 кг/м³

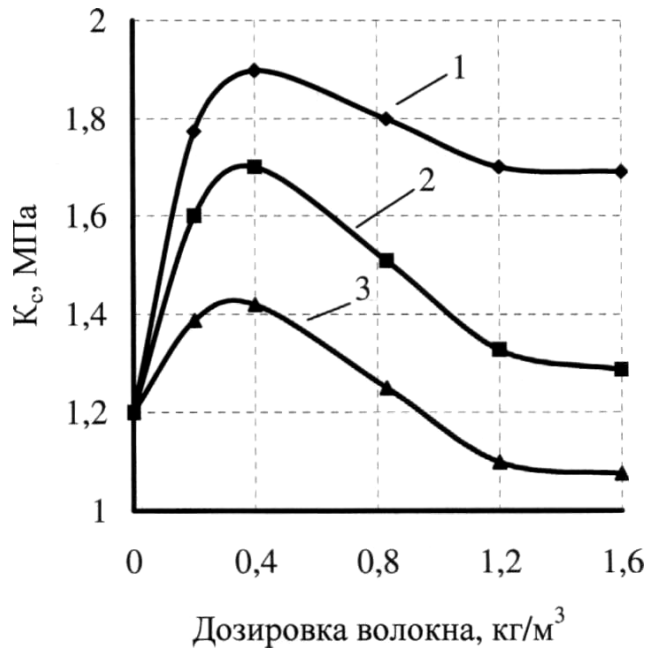


Рис. 6.6. Зависимость критерия трещиностойкости K_c^* от дозировки волокна:
1 – длина полиамидного волокна 6 мм; 2 – то же 12 мм; 3 – то же 18 мм

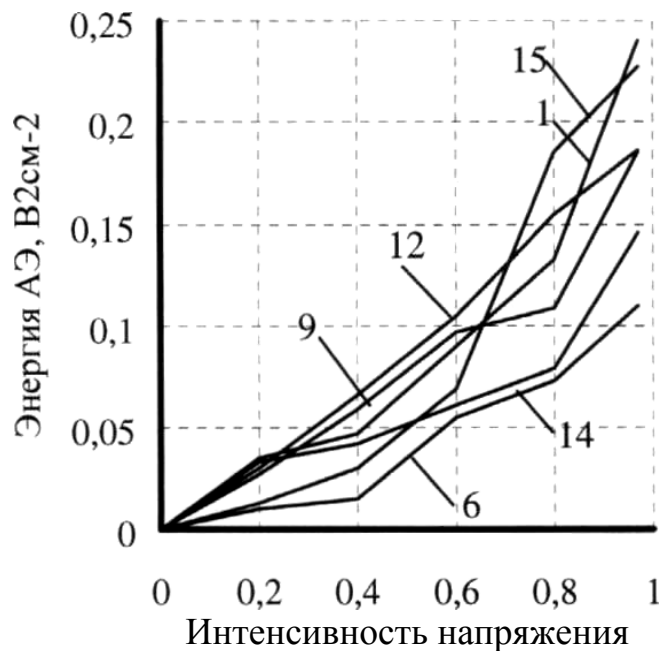


Рис. 6.7. Зависимость энерговыделений АЭ бетона от уровня напряжений при изгибе (номера графических зависимостей приняты по табл. 6.1, 6.2)

Таким образом, комплексное дисперсное армирование бетона ультрадисперсным наполнителем на микроуровне и армирующими полиамидными волокнами на макроуровне является эффективным средством повышения его прочности и трещиностойкости. Поэтому применение многоуровневого дисперсного армирования структуры бетона на микро- и макроуровнях с целью повышения трещиностойкости является важной предпосылкой получения бетонов нового поколения с более широкими функциональными возможностями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании теоретических представлений и известных экспериментальных данных о использовании высокодисперсных микрокремнеземов и зол в производстве высокопрочных и высококачественных бетонов показаны целесообразность поиска новых минеральных комбинированных ультрадисперсных наполнителей (УДМН), характеризующихся низкой водопотребностью, на основе техногенных отходов, возможности их получения и применения в производстве высокопрочных бетонов с целью снижения усадки и повышения усадочной трещиностойкости.

Изучены и выявлены методологические и технологические аспекты создания ультрадисперсных минеральных наполнителей на основе техногенных отходов. Разработан способ получения УДМН в аэродинамическом трубчатом сепараторе, основанный на разделении частиц наполнителя по длине сепаратора в ламинарном воздушном потоке. В качестве технологических критериев ламинарного воздушного потока приняты: скорость движения воздуха, принимаемая исходя из числа Рейнольдса ($Re \leq 1000$) не более 0,23 м/с, диаметр трубы 100 мм. В результате распыления были выделены ультрадисперсные минеральные наполнители на основе техногенных отходов следующей удельной поверхности: 1343 м²/кг – отход от срезки «горбуши» газобетона, 1025 м²/кг – «бой» силикатного кирпича и 1012 м²/кг – перлит при их плотности 2,1; 2,55; 1,79 кг/м³ соответственно.

Выполнена оценка водоредуцирующей эффективности и реологического действия С-3 в цементных суспензиях в зависимости от вида и удельной поверхности ультрадисперсных наполнителей. Установлено снижение водопотребности на 11 % при совместном введении кристаллической затравки силикатного кирпича и микрокремнезема, взятых в соотношении 2:1 и вводимых в количестве 12,5 % от массы цемента. Максимально высокий уровень понижения водопотребности $B_d = 58,5$ % цементной суспензии достигается при введении 25 % от массы цемента «боя» силикатного кирпича при его удельной поверхности $S_{уд} = 1025$ м²/кг.

Выявлено влияние удельной поверхности УДМН на усадочные деформации цементного камня и высокопрочного бетона. Оптимальная дозировка УДМН, обеспечивающая минимальные деформации усадки цементного камня, не превышает 15 % от расхода цемента, независимо от вида наполнителя.

С повышением удельной поверхности «боя» силикатного кирпича от $S_{уд} = 405$ м²/кг до $S_{уд} = 1025$ м²/кг усадочные деформации цементного камня снижаются на 20 %. Увеличение дисперсности газобетона от $S_{уд} = 413$ м²/кг до $S_{уд} = 1343$ м²/кг способствует уменьшению их на 10 %.

Исследована усадочная трещиностойкость цементного камня, модифицированного УДМН, в результате многократного циклического «насыщения в воде – высушивания». Ширина раскрытия трещин цементного

камня с органоминеральным наполнителем составила: 0,55 мм – для «боя» силикатного кирпича, 0,51 мм – для смеси «боя» силикатного кирпича и микрокремнезема БС-120, 0,64 мм – для отхода от срезки «горбуши» газобетона, 0,12 мм – для перлита. С увеличением дисперсности ширина раскрытия трещин уменьшилась на 6-12 %.

Установлено, что удаление влаги в обычных немодифицированных бетонах приводит к сильному возрастанию усадочных деформаций и появлению трещин. Для бетона контрольного состава без добавок усадка в течение 40 сут составила 0,5 мм/м. Ширина раскрытия трещин для этого бетона достигла 0,025 мм после первого цикла. После третьего ширина раскрытия трещин увеличилась до 0,1 мм. Усадка бетона, модифицированного «боем» силикатного кирпича, за 40 сут достигла 0,25 мм/м, для бетона с комбинированной добавкой на основе порошка из «боя» силикатного кирпича и микрокремнезема составила 0,22 мм/м, и при этом образования трещин не наблюдалось.

Для обеспечения минимальной усадочной трещиностойкости в процессе попеременного циклического увлажнения и высушивания дисперсность минеральных модификаторов должна быть не менее 1025 м²/кг, а оптимальная степень наполнения в зависимости от вида минерального наполнителя не должна превышать 15 %. Установленная оптимальная величина наполнения бетона с комбинированной добавкой на основе порошка микрокремнезема и автоклавированных техногенных отходов, обеспечивающая минимальную усадку и повышенную усадочную трещиностойкость, может быть доведена до 15-20 % без снижения прочности.

Изучено влияние дозировки и длины металлических волокон на прочность дисперсно-армированного бетона. Максимальное значение прочности бетона на растяжение при изгибе получено при длине волокон 5 и 10 мм и дозировке 1,5 % и 2 %, а прочности на сжатие – при длине 5 мм и дозировке 1 %.

Произведена оценка идеализированной картины распределения волокон в бетоне, рассчитаны геометрические критерии армирования, на основании которых найдены варианты малоэффективного армирования и переармирования бетона.

Установлено влияние армирования бетона на ударную вязкость. Появление первой трещины в бетоне с волокнами длиной 10 мм и дозировке 1,5 % соответствует работе разрушения $A = 32,65$ Дж/см³, а для бетона без волокон $A = 6,06$ Дж/см³. Установлено также, что ширина раскрытия трещин в бетоне становится меньше с увеличением длины волокон и дозировки.

Применение комплексного армирования высокопрочных бетонов позволило существенно повысить их трещиностойкость. Ширина раскрытия трещин дисперсно-армированного бетона составила: 0,025 мм – при использовании волокна длиной 12 мм и 0,2 мм – длиной 6 мм. Многоуровневое дисперсное армирование структуры бетона на микро- и макроуровнях является эффективным технологическим приемом получения бетонов с более широкими функциональными возможностями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер, И. Исследование свойств суперпластификатора ВЕТОСРЕТЕ [Текст] / И. Адлер, В. Гутч // Экспресс-информация. – 2000. – №3. – С. 27-29.
2. Александровский, С.В. К итогам Международного симпозиума по усадке бетонов [Текст] / С.В. Александровский // Бетон и железобетон. – 1968. – №11. – С. 8-9.
3. Александровский, С.В. Некоторые особенности усадки бетона [Текст] / С.В. Александровский // Бетон и железобетон. – 1959. – №10. – С. 8-10.
4. Александровский, С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия [Текст] / С.В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1966. – 425 с.
5. Александровский, С.В. Экспериментально-теоретические исследования усадочных напряжений в бетоне [Текст] / С.В. Александровский. – М.: Стройиздат, 1965. – 285 с.
6. Александровский, С.В. Ползучесть бетона при периодических воздействиях внешней среды [Текст] / С.В. Александровский, В.Я. Багрий. – М.: Стройиздат, 1970. – 166 с.
7. Ананенко, А.А. Влияние условий хранения образцов на деформативные свойства бетонов, изготовленных на цементах разного состава [Текст] / А.А. Ананенко // Известия. – 1999. – №9. – С. 43-46.
8. Ананенко, А.А. О расчетных и фактических величинах предельной относительной деформации усадки бетона [Текст] / А.А. Ананенко // Сб. тр. НИИЖТа. – Новосибирск, 1970. – С. 80-92.
9. Арутюнян, Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести [Текст] / Н.Х. Арутюнян. – М.: Гостехтеоретиздат, 1952. – 206 с.
10. Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон [Текст] / И.Н. Ахвердов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 162 с.
11. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона [Текст] / И.Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
12. Баженов, Ю.М. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии [Текст]: материалы 1-й Всерос. конф. по бетону и железобетону / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман. – М., 2001. – С. 91-101.
13. Бакстер, С. Бетон с заполнителем из стеклянного боя [Текст] / С. Бакстер, С. Майер // Экспресс-информация. – 2002. – №6. – С. 30-32.
14. Батраков, В.Г. Модификаторы бетона – новые возможности [Текст]: материалы 1-й Всерос. конф. по бетону и железобетону / В.Г. Батраков. – М., 2001. – С. 184-197.
15. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны [Текст] / В.Г. Батраков. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.

16. Батраков, В.Г. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон [Текст] / В.Г. Батраков, С.С. Каприелов, Ф.Н. Иванов, А.В. Шейнфельд // Бетон и железобетон. – 1990. – №12. – С. 15-17.

17. Батраков, В.Г. Суперпластификатор-разжижитель СМФ [Текст]/ В.Г. Батраков, В.Р. Фаликман, М.Г. Булгакова // Бетон и железобетон. – 1985. – №5. – С. 18-20.

18. Батраков, В.Г. Применение химических добавок в бетоне [Текст]/ В.Г. Батраков, Р. Шурань. – М.: ВНИИХМ, 1882. – С. 15-16

19. Берг, О.Я. О предельном состоянии железобетонных конструкций по долговечности [Текст]/ О.Я.Берг // Бетон и железобетон. – 1964. – №11. – С.8-10.

20. Берг, О.Я. Напряженное состояние бетона в зоне расположения предварительно напряженной арматуры [Текст] / О.Я. Берг, Г.Н. Писанко, Ю.Н. Хромец, Е.Н. Щербаков //Транспортное строительство. – 1964. – №1. – С. 6-8.

21. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон [Текст]/ О.Я. Берг, Ю.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.

22. Беркович, Я.Б. Исследование микроструктуры и прочности цементного камня, армированного коротковолокнистыми хризотил-асбестами [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Я.Б. Беркович. – М., 1975. – 22 с.

23. Бернал, Д. Структура продуктов гидратации цемента [Текст] / Д. Бернал // тр. 3-го Междунар. конгресса по химии цемента. – М.: Госстройиздат, 1958.

24. Буркасов, Б.В. Бетоны, наполненные модифицированными шлаками [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б.В. Буркасов. – М., 1996. – 20 с.

25. Василик, П.Г. Применение волокон в сухих строительных смесях [Текст] / П.Г. Василик. И.В. Голубев // Строительные материалы. – 2002. – №9. – С.26-27.

26. Величко, Е.Г. Повышение эффективного использования минеральных модификаторов, путем оптимизации дисперсного состава бетона [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е.Г. Величко. – М., 1998. – 23 с.

27. Венюа, М. Цементные бетоны в строительстве [Текст] / М. Венюа. – М.: Стройиздат, 1980. – 415 с.

28. Власов, В.К. Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя [Текст]/ В.К. Власов // Бетон и железобетон. – 1988. – №10. – С.9-11.

29. Влияние суперпластификаторов 10-03 и 30-03 на свойства бетонной смеси и бетона с учетом химико-минералогического состава цементов [Текст]. – М.: Знание, 1980. – С.54-56.

30. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества [Текст] / А.В. Волженский. – М.: Стройиздат, 1986.

31. Высоцкий, С.А. Минеральные добавки для бетонов [Текст] / С.А. Высоцкий // Бетон и железобетон. – 1994. – №2. – С.7-10.
32. Глужге, П.И. Усадка бетона при циклическом нагревании и охлаждении. [Текст] / П.И. Глужге // Исследование по бетону и железобетону. – Рига: Изд-во АН Латв. ССР, 1963. – 234 с.
33. Дехтярева, М.М. Технология и свойства бетона с бинарным наполнителем «кварц-известняк» [Текст]: автореф. дис ... канд. техн. наук / М.М. Дехтярева. – М., 1995. – 19 с.
34. Демьянова, В.С. Методологические и технологические основы производства высокопрочных бетонов с высокой ранней прочностью для беспрогревных и малопроевных технологий [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.С. Демьянова. – Пенза, 2003. – 43 с.
35. Демьянова, В.С. Бетон классов В80-100 на основе рядового портландцемента с добавкой тонкомолотого наполнителя и их экономическая оценка [Текст] / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, А.В. Борисов // Известия высших учебных заведений. – М.: Строительство, 1998. – №9. – С.33-35.
36. Демьянова, В.С. Армирование бетона полиамидными волокнами [Текст] / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, Е.Ю. Миненко // Пластические массы. – 2003. – № 3. – С. 44-45.
37. Демьянова, В.С. Повышение усадочной трещиностойкости бетона полиамидным волокном [Текст] / В.С. Демьянова, Е.Ю. Миненко // Строй-инфо. – 2003. – №14.
38. Демьянова, В.С. Усадка бетона с органоминеральными добавками [Текст] / В.С. Демьянова, Е.Ю. Миненко // Строй-инфо. – 2003. – №13.
39. Демьянова, В.С. Высокопрочный фибробетон [Текст] / В.С. Демьянова, Е.Ю. Миненко, А.С. Мишин // Экспресс-информация ВНИИТПИ. – 2003. – С. 39-112.
40. Демьянова, В.С. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочного бетона [Текст] / В.С. Демьянова, В.И. Калашников, Е.Ю. Миненко. – М., 2003. – Биб. ук. №1. – 60 с. – Деп. рукоп., №11912.
41. Десов, А.Е. Вопросы технологии жестких бетонных смесей для получения высокопрочного бетона [Текст] / А.Е. Десов // Тоннельные отделки из сборного железобетона: сб. Трансжелдориздат, 1956.
42. Дофф, В.А. Исследование усадки керам-зитобетона по схеме «бетон – раствор» [Текст] / В.А. Дофф, В.Г. Довжик, И.А. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 170-176.
43. Егорочкина, И.О. Структура и свойства бетонов с комплексной усадкой на вторичных заполнителях [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.О. Егорочкина. – Ростов н/Д, 1998. – 18 с.
44. Жуков, В.В. Свойства бетона с шунгитовыми заполнителями при нормальных и высоких температурах [Текст] / В.В. Жуков, И.Ф. Баленко // Бетон и железобетон. – 1987. – №7. – С.16-17.

45. Звездов, А.И. Бетон с компенсированной усадкой для возведения трещиностойких конструкций большой протяженности [Текст] / А.И. Звездов // Бетон и железобетон. – 2001. – №4. – С. 17-20.

46. Зоткин, А.Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне [Текст] / А.Г. Зоткин // Бетон и железобетон. – 1994. – №3. – С.7-9.

47. Искандеров, Т.Н. . Оптимизация состава высокопрочного бетона на щебне из доменного шлака методом математической статистики [Текст] / Т.Н. Искандеров, Ш.Т. Бабаев, А.А. Комар // Науч.-практ. конф. «Прогрессивные ресурсосберегающие процессы в технологии строительных материалов, изделий и их контроль». – Брянск, 1984. – С.6-8.

48. Иссерс, Ф.А. Прочностные и деформационные свойства высокопрочного бетона с модификатором МБ 10-01 [Текст] / Ф.А. Иссерс, М.Г. Булгакова // Бетон и железобетон. – 1999. – №3. – С.6-8.

49. Иссерс, Ф.А. Исследования деформаций усадки и набухания бетона, пропитанного нефтепродуктами [Текст] / Ф.А. Иссерс // Экспресс-информация. – 2002. – №2. – С. 20-29.

50. Калашников, В.И. Усадка и усадочная трещиностойкость цементного камня из пластифицированных и непластифицированных цементных композиций [Текст] / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, Е.Ю. Селиванова // Седьмые академические чтения РААСН «Современные проблемы строительного материаловедения». – Белгород, 2001. – С. 171-179.

51. Калашников, В.И. Сравнительная оценка усадки цементного камня из пластифицированных и непластифицированных цементно-водных суспензий [Текст] / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, А.А. Борисов, А.Н. Бобрышев // Пятые академические чтения РААСН «Современные проблемы строительного материаловедения». – Воронеж. 1999. – С. 312-315.

52. Калашников, В.И. Методологические и технологические аспекты получения и применения высокодисперсных наполнителей бетонов [Текст] / В.И. Калашников, В.С. Демьянова, Е.Ю. Миненко // Строительные материалы. – 2003. – № 9. – С. 14-18.

53. Каприелов, С.С. Деформативные свойства бетонов с использованием ультрадисперсных отходов Ермаковского завода ферросплавов [Текст] / С.С. Каприелов, М.Г. Булгакова, Я.Л. Вихман // Бетон и железобетон. – 1991. – №3. – С. 24-25.

54. Каприелов, С.С. Влияние органоминерального модификатора МБ-50С на структуру и деформативность цементного камня и высокопрочного бетона [Текст] / С.С. Каприелов, Н.И. Карпенко // Бетон и железобетон. – 2001. – №4. – С.2-7.

55. Каприелов, С.С. Влияние состава органоминеральных модификаторов бетона серии «МБ» на их эффективность [Текст] / С.С. Каприелов, А.В. Шеренфельд // Бетон и железобетон. – 1995. – №5. – С.11-15.

56. Каприелов, С.С. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива [Текст]/ С.С. Каприелов, А.В. Шеренфельд, А.В. Батраков// Бетон и железобетон. – 1996. – №6. – С.6-10.

57. Каприелов, С.С. Комплексный модификатор бетона марки МБ-01 [Текст]/ С.С. Каприелов, А.В. Шеренфельд, А.В. Батраков // Бетон и железобетон. – 1996. – №5. – С.38-41.

58. Каприелов, С.С. Влияние структуры цементного камня с добавками микрокремнезема и суперпластификатора на свойства бетона [Текст] / С.С. Каприелов, А.В. Шеренфельд, Ю.Р. Кривобородов// Бетон и железобетон. – 1992. – №7. – С.4-7.

59. Карапетян, К.С. Влияние масштабного фактора на ползучесть бетона при сжатии и растяжении [Текст] / К.С. Карапетян // Доклады АН Арм. ССР. – 1963. – Т. 38. – №3. – С.80-83.

60. Каталог основных строительно-технологических свойств цементов [Текст]. – М.: ОНИЛ «Цемент», 1990.

61. Кинд, В.А. Деформации усадки и набухания при твердения портландцемента различного химического состава [Текст] / В.А. Кинд, С.Д. Окорочков, С.А. Вольфсон // Цемент. – 1937. – №8. – С. 7-14.

62. Комохов, П.Г. Механико-технологические основы торможения процессов разрушения бетонов ускоренного твердения [Текст]: автореф. дис ... д-ра техн. наук / П.Г. Комохов. – Л., 1979. – 37 с.

63. Краснов, А.М. Усадочные деформации высоконаполненного высокопрочного мелкозернистопесчаного бетона [Текст]/ А.М. Краснов // Бетон и железобетон. – 2001. – №7. – С. 8-11.

64. Красный, И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителя [Текст]/ И.М. Красный// Бетон и железобетон. – 1987. – №5. – С. 10-11.

65. Кричевский, А.П. Усадка и ползучесть тяжелого бетона при повышенных температурах [Текст]/ А.П. Кричевский. – М.: Стройиздат, 1974. – 237 с.

66. Ларионова, З.М. Образование гидросульфоалюмината кальция и его влияния на основные свойства быстротвердеющего цемента [Текст] / З.М. Ларионова. – М.: НИИЖБ, 1959. – 64 с.

67. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона [Текст]/ Р. Лермит. – М.: Госстроиздат, 1959. – 126 с.

68. Ли, Ф. Дискуссия по докладу Д. Бернала [Текст] / Ф.Ли //тр. 3-го Междунар. конгресса по химии цемента. – М.: Госстройиздат, 1958. – С. 254-262.

69. Ли, Ф. Химия цемента и бетона [Текст] / Ф. Ли. – М.: Высшая школа, 1959. – 335 с.

70. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Гостехтеориздат, 1954. – 284 с.

71. Лысенко, Е.И. Температурно-влажностные деформации ракушечникового заполнителя и их влияния на структурные характеристики бетона [Текст]/ Е.И. Лысенко // Стойкость и деформативность легкого бетона. – 1974. – С. 33-40.
72. Майлян, Р.Л. Исследование вопросов усадки бетона [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Р.Л. Майлян. – Баку, 1953. – 387 с.
73. Макридин, Н.И. Структура, деформативность, прочность и критерий разрушения цементных композитов [Текст] / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова. – Саратов, 2001. – 280 с.
74. Мейер, Р. Новые данные по усадке бетона [Текст]/ Р. Мейер, К. Нильсон. – М.: Стройиздат, 1960. – С.116-139.
75. Мельник, Р.А. Усадка и ползучесть бетона марки 800 [Текст] / Р.А. Мельник, Г.А. Соколова // тр. НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 144-151.
76. Михеев, Н.М. К вопросу о классификации стальных фибр для дисперсного армирования бетонов [Текст]/ Н.М. Михеев, К.В. Талантова // Бетон и железобетон. – 2003. – №2. – С. 9-11.
77. Моргун, Л.В. Эффективность применения фибропенобетона в современном строительстве [Текст] / Л.В. Моргун // Строительные материалы. – 2002. – №3. – С. 16-17.
78. Моргун, Л.В. Влияние дисперсного армирования на агрегатную устойчивость пенобетонных смесей [Текст]/ Л.В. Моргун, В.Н. Моргун // Строительные материалы. – 2003. – №1. – С. 33-35.
79. Мощанский, Н.А. Плотность и стойкость бетонов [Текст] / Н.А. Мощанский. – М.: Госстройиздат, 1951. – С. 420.
80. Некрасов, В.В. Изменение объема системы при твердении гидравлических вяжущих [Текст]/ В.В. Некрасов // Известия Академии наук СССР. – М., 1945. – №6. – С. 592-610.
81. Некрасов, В.В. Кинетика гидратации цементов различных типов ЖПХ [Текст] / В.В. Некрасов. – М., 1948. – №3. – С.9-12.
82. Несветаев, Г.В. Закономерности деформирования и прогнозирования стойкости бетона при силовых и температурных воздействиях [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Г.В. Несветаев. – Ростов н\Д, 1998. – 400 с.
83. Несветаев, Г.В. О прогнозирование раннего трещинообразования высокопрочного бетона [Текст]/ Г.В. Несветаев, С.А. Тимонов // Пятые академические чтения РААСН. – Воронеж, 1999. – С. 305-310.
84. Несветаев, Г.В. Усадочные деформации и раннее трещинообразование бетона [Текст]/ Г.В. Несветаев, С.А. Тимонов// Пятые академические чтения РААСН. – Воронеж, 1999. – С. 312-315.
85. Нилендер, Ю.А. Исследование деформаций и температурного режима в теле плотины Днепростроя [Текст]/ Ю.А. Нилендер. – М.: Стройиздат, 1933. – 380 с.

86. Нилендер, Ю.А. Монолитность массивной бетонной кладки, возводимой из отдельных блоков. Коррозия бетона и меры борьбы с ней [Текст]/ Ю.А. Нилендер / АН СССР. – М., 1954. – 386 с.

87. Нилендер, Ю.А. Поверхностная прочность бетона и связь ее с появлением трещин [Текст]/ Ю.А. Нилендер // Тр. конф. по коррозии бетона / АН СССР. – М., 1937. – 284 с.

88. Ольгинский, А.Г. Пылеватые минеральные добавки к цементным бетонам [Текст] / А.Г. Ольгинский // Строительные материалы и конструкции. – 1990. – №3. – С. 18.

89. Остриков, М.С. Влияние сил капиллярной контракции на механические свойства и структуру высыхающих тел [Текст]/ М.С. Остриков, И.В. Ростовцева// Коллоидный журнал. – 1960. – №4. – С. 12-16.

90. Пантелеев, А.С. О дисперсном составе цементов и бетонов [Текст]/ А.С. Пантелеев // Сб. науч. тр. по вяжущим / МХТИ. – М.: Промиздат, 1949.– С. 111-132.

91. Панченко, А.И. Обеспечение стойкости бетона к физическим воздействиям внешней среды путем управления собственными деформациями [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А.И. Панченко. – Ростов н\Д: РГСУ, 1996. – 35 с.

92. Сайд Мухаммед Сайд. Исследования деформаций усадки и набухания бетона, пропитанного нефтепродуктами [Текст]/ Сайд Мухаммед Сайд // Экспресс-информация. – 2001. – №5. – С 32-39.

93. Свечин, Н.В. Некоторые вопросы определения прочности бетонов [Текст]/ Н.В.Свечин, Г.В.Сизов // Совершенствование методов исследований цементного камня, раствора и бетона. – М.: Стройиздат, 1968. – С. 189-200.

94. Свиридов, Н.В. Бетон прочностью 150 МПа на рядовых портландцементов [Текст]/ Н.В. Свиридов, М.К. Коваленко // Бетон и железобетон. – 1990. – №10. – С.21-22.

95. Свиридов, Н.В. Механические свойства особопрочного цементного бетона [Текст]/ Н.В. Свиридов, М.К. Коваленко // Бетон и железобетон. – 1991. – №2. – С.7-9.

96. Силаенков, Е.С. Влияние карбонизации автоклавных ячеистых бетонов на их долговечность [Текст]/ Е.С. Силаенков // Тр. НИИ по строительству. – Свердловск, 1965. – 187 с.

97. Сеница, М.С. Влияние структуры поризованного бетона на его деформации и прочность [Текст]/ М.С. Сеница, А.В. Дудик// Строительные материалы. – 2002. – №11. – С. 32-34.

98. Симакина, Г.Н. Высокопрочный дисперсно-армированный бетон [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.Н. Симакина. – Пенза, ПГУАС, 2006. – 30 с.

99. Скрамтаев, Б.Г. Исследование явления вакуума в твердеющих цементах [Текст]/ Б.Г. Скрамтаев, Л.И. Памфилова // Тр. НИИЦемент. – М., Стройиздат, 1949. – Вып.2. – 78 с.

100. Славичева, Г.С. Структурные факторы управления эксплуатационной деформативностью цементного поризованного бетона для монолитных конструкций [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.С. Славичева. – Воронеж, 1998. – 27 с.

101. Стольников, В.В. Трещиностойкость бетона [Текст]/ В.В. Стольников, Р.Е. Литвинова. – М.: Энергия, 1972. – 112 с.

102. Тимашев, В.В. Свойства цементов с карбонатными добавками [Текст]/ В.В. Тимашев, В.И. Колбасов // Цемент. – 1981. – №10. – С.10-12.

103. Тимашев, В.В. К вопросу о армировании цементного камня [Текст]/ В.В. Тимашев, И.И. Сычева, Н.С. Никонова // Тр. МХТИ им. Д.И. Менделеева. – М., 1976. – Вып. 2. – С. 155-156.

104. Тимашев, В.В. Формирование высокопрочной структуры цементного камня [Текст]/ В.В. Тимашев, М. Хендрик // Тр. ин-та МХТИ, 1981. – Вып.118. – С.89-95.

105. Улицкий, И.И. Определение величин деформаций ползучести и усадки бетона [Текст]/ И.И. Улицкий. – Киев: Госстройиздат УССР, 1963. – 145 с.

106. Хахуташвили, Е.Е. Усадка легких бесцементных бетонов автоклавного твердения [Текст]/ Е.Е. Хахуташвили // Тр. НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 165-170.

107. Хун, Д.Д.Л. Свойства бетонов, содержащих микрокремнезем и углеродное волокно, обработанные силанами [Текст]/ Д.Д.Л. Хун // Экспресс-информация. – 2001. – №1. – С. 33-37.

108. Цилосани, З.Н. Усадка и ползучесть бетона [Текст]/ З.Н. Цилосани. – Тбилиси: Изд-во АН Груз. ССР, 1963. – 173 с.

109. Цискрели, Г.Д. О масштабном эффекте в бетонах [Текст] / Г.Д. Цискрели, Г.Л. Лекишвили // Бетон и железобетон. – 1966. – №10. – С. 29-31.

110. Чен, С.И.Н. Исследование свойств высокопрочного бетона с добавкой разжижителя [Текст]/ С.И.Н. Чен // Экспресс-информация. – 2000. – №5. – С. 29-32.

111. Чернышов, Е.М. Анализ энергетических характеристик разрушения строительных композиционных материалов с многоуровневым дисперсным армированием [Текст]/ Е.М. Чернышов, Е.И. Дьяченко, Д.Н. Коротких// Пятые академические чтения РААСН. – Воронеж. 1999. – С. 534-538.

112. Чернышов, Е.М. Повышение трещиностойкости мелкозернистого цементного бетона при многоуровневом дисперсном армировании его структуры [Текст]/ Е.М. Чернышов, Д.М. Коротких // Шестые академи-

ческие чтения РААСН «Современные проблемы строительного материаловедения». – Белгород, 2001. – С.587-598.

113. Шейкин, А.В. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня [Текст]/ А.В. Шейкин. – М.: Стройиздат, 1974. – 191 с.

114. Шейкин, А.В. Структура и свойства цементных бетонов [Текст]/ А.В. Шейкин. Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 333 с.

115. Шейкин, Л.Е. К вопросу прочности, упругости и пластичности бетона [Текст]/ Л.Е. Шейкин // Труды МИИТ. – 1946. – Вып.69.

116. Шейкин, Л.Е. Влияние минералогического состава цемента на усадку бетона [Текст]/ Л.Е. Шейкин, М.Н. Гершман // Труды НИИЦемент. – М.: Стройиздат, 1949. – Вып.2. – 78 с.

117. Штейерт, Н.П. Изучение сцепления цементного камня с заполнителем с целью изыскания способов увеличения прочности бетона [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.П.Штейерт. – М., 1951.

118. Щербаков, Е.Н. К оценки модуля упругости тяжелого бетона и раствора [Текст]/ Е.Н. Щербаков // Бетон и железобетон. – М., 1970. – №3. – С. 6-9.

119. Щербаков, Е.Н. О прогнозе величин деформаций ползучести и усадки тяжелого бетона в стадии проектирования конструкций [Текст]/ Е.Н. Щербаков // Транспорт. – 1969. – № 70. – С. 38.

120. Щербаков, Л.М. О связи молекулярного и фазового давления со степенью дисперсности [Текст] / Л.М.Щербаков. – Кишинев, 1949. – 125 с.

121. Якобсон, К.К. Влияние состава цемента на усадку высокопрочного бетона [Текст]/ К.К. Якобсон, В.В. Нижевясов // Известия вузов. – М., 1967. – №7. – С. 94-101.

122. Якобсон, К.К. Упругие и усадочные деформации высокопрочного бетона на цементах различных составов [Текст] / К.К. Якобсон, В.В. Нижевясов// Тр. НИИЖТа. – Новосибирск, 1968. – С. 134-145.

123. Сталефибробетонные конструкции зданий и сооружений [Текст]. – М.: ВНИИТПИ ГОССтроя СССР, 1990. – №7.

124. Impact response of ultra-high-strength fiber-reinforced cement composite [Text]/ V. Bindiganavile, N. Banthia, B. Aarup //ACI Materials Journal. – 2002. – Vol. 99. – №6. – P. 543-548.

125. Blanks, R. Cracking in mass Concrete [Text]/ R.Blanks, H.Meissner, C. Rawhouser //Journal of the American Concrete Institute. – 1938. – Vol.9. – №4. – P. 4-9.

126. Carlson, R.W. Drying Shrinkage as Affected by Many Factors [Text]/ R.W. Carlson //Proc of the Amer. Soc. for Test. Mat. – 1938. – Vol.38. – P. 11.

127. Carlson, R.W. During shrinkage as effected by many factors [Text]/ R.W. Carlson // Proceedings of the ASTM. – 1938. – Vol.38. – P. 2.

128. Concrete manual [Text]/ US Bureau Reclamation – Denver, 1942. – 4th edition. – P. 23-27.
129. Dallaire, E. High-performance powder [Text]/ E. Dallaire, P.C. Aitcin, M. Lachemi // Civil Engineering. – 1998. – Vol.68. – №1. – P. 49-51.
130. Dutron, R. Le retrait des cement, mortiers et betons [Text]/ R. Dutron // Annales des travaux publics de Bergigue. – 1934. – ann 87. – № 23. – P.123-125.
131. Evans, R.H. Estimation of creep of concrete in reinforced and prestressed concrete design [Text]/ R.H. Evans, F.K. Kong // Givil engineering and public works review. – 1966. – Vol.61.
132. Hiittl, R. Der Reaktionsmechanismus von Flugasche, chemisch oder physikalisch [Text]/ R. Hiittl // 14. Int. Baustofftagung «ibausil». (Weimar 2000). – P. 1-347 – 1-360.
133. Hooton, R.D. Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete [Text]/ R.D. Hooton // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2000. – №4. – P. 754-760.
134. Frohnsborff, G. Fly ash in Cement and Concrete Technical Needs Opportunities [Text]/ G.Frohnsborff, J.R. Clifton // National Bureau of Standards. – 1981. – NBSIR 81-2239.
135. Glanville, W.H. Work of the building research Station on small movements in Concrete Congress de Liege[Text]/ W.H.Glanville //Beton Arme. – 1930. – P. 18-22.
136. Kalousek, G.L. Fundamental Factors in the Drying Shrinkage of Concrete[Text]/ G.L. Kalousek //Block Journal of the American Concrete Institute. – 1954. – Vol.51, vol.26. – №3.
137. Kelly, A. Strong Solids [Text]/ A. Kelly //Oxford University. Press. – 1973. – P. 257.
138. Lea, F.M. The Chemistry of Concrete and Concrete [Text]/ F.M. Lea // St. Martin's press. N.J.Rew. Ed., 1956.
139. Lenz, C.W. Effect of Carbon Dioxide on Silicate Structures in Portland Cement Paste [Text]/ C.W. Lenz //36th Congress on Industrial Chemistry. – Brussels,1967. – №1. – P. 45.
140. Mehta, P.K. and Haynes H. Portability of concrete in sea water [Text]/ P.K. Mehta // Journal of the American Society of Civil Engineers. – 1975. – Vol.101. – №8. – P. 1676-1686.
141. Mehta, P.K. Durability of concrete in marine environment- a review [Text]/ P.K. Mehta // American Concrete Institute the Special Publication. – 1980. – № 65. – P. 1-20.
142. Peled, A. High content of fly ash (class F) extruded cementations composites [Text]/ A.Peled, M.E. Cyr // ACI Materials Journal. – 2000. – Vol. 97. – №5. – P. 509-517.

143. Powers, T.C. Studies of the physical Properties of Hardened Portland Cement Paste [Text]/ T.C. Powers, T.L. Brownyard// Journal of the American Concrete Institute. – 1946. – Vol.18. – № 2, 3, 4, 5, 6. – 1947. – Vol.19. – №1.
144. Regaird, M. Physico-chemical studies of cement pastes, mortars and concretes exposed to sea water [Text]/ M. Regaird // American Concrete Institute Special Publication. – 1980. – № 65. – P.63-82.
145. Spindel, M. Uber dit Schwindung von Zement und Beton [Text] / M. Spindel // Beton und Eisen. – 1936. – H.15. – P. 18.
146. Tonindustrie-zeitund [Text]. – 1881, 1889. – P. 15.
147. Verbeck, C.I. Carbonization of Hydrated Portland Cement [Text] / C.I. Verbeck // Am.Soc. for Testing Materials – Special Technical Publication. – 1958. – №205.
148. Verbeck, G.J. Carbonation of Hydrated Portland Cement [Text] / G.J. Verbeck // ASTM Special Technical Publication. – 1958. – № 205. – P. 17-36.
149. Walker, S. Effect of aggregate size on properties of concrete [Text] / S. Walker, D.L. Bloem // ACI Journal. – 1960. – Vol. 57. – №3. – 1961. – №9.
150. Washa, G.W. Comparison of the physical and mechanical properties of hand-rolled and vibrated concrete, made with different cements [Text] / G.W. Washa // ACI Journal. – 1947. – Vol. 44. – №3.
151. Washa, G.W. Effect of sustained loading on compressive strength and Hooton RD Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete [Text]/ G.W. Washa, P.C. Fluck // Canadian Journal of Civil Engineering. – 2000. – Vol.27. – №4. – P. 754-760.

Научное издание

Калашников Владимир Иванович
Миненко Екатерина Юрьевна
Грачева Юлия Вячеславовна

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ
ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ДОРОЖНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Монография

Редактор М.А. Сухова
Верстка Н.В. Кучина

Подписано в печать 26.03.2013. Формат 60x84/16.
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.
Усл.печ.л. 7,96. Уч.-изд.л. 8,56. Тираж 500 экз. 1-й завод 100 экз.
Заказ № 80.

Издательство ПГУАС.
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28

