Миненко Екатерина Юрьевна. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами : Дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 : Пенза, 2004 147 c. РГБ ОД, 61:04-5/3744

**ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АРХИТЕКТУРЫ И СТРОИТЕЛЬСТВА**

На правах рукописи



**Миненко Екатерина Юрьевна**

**УСАДКА И УСАДОЧНАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ С ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫМИ МОДИФИКАТОРАМИ**

1. — Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор B.C. Демьянова

**Пенза 2004**

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ 4

[ВВЕДЕНИЕ 4](#bookmark2)

Глава 1. СОВРЕМЕННЫЕ НАУЧНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ УСАДКЕ И УСАДОЧНОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА 10

1. Усадка и усадочная трещиностойкость цементного камня и бетона, как фактор долговечности конструкционного материала. Класси­фикация усадки 11
2. [Основные закономерности развития усадочных деформаций в зависимости от рецептурно-технологических факторов 23](#bookmark3)
3. Влияние эффективных суперпластификаторов, наполнителей и микроармирующих добавок на усадку и усадочную трещиностойкость

высокопрочного бетона 34

Глава 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ 42

1. Характеристика исходных материалов 42
2. Методика подготовки исходных материалов, формования опытных образцов и физико-механических испытаний 48
3. Методика получения ультрадисперсних наполнителей 48
4. Методика оценки гидратации цемента ..52
5. Методика оценки свободного оксида кальция 53
6. Методика формования опытных образцов и физико-механи­

ческих испытаний 54

1. Оценка влияния масштабного фактора и размеров образцов на

усадку бетона 50

Выводы по главе 2 63

[Глава 3. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МИКРОНАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ГИДРАТАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЦЕМЕНТ­НЫХ СИСТЕМ 64](#bookmark8)

1. [Оценка влияния ультрадисперсных минеральных наполнителей на водопотребность цементных суспензий 64](#bookmark9)
2. [Процессы гидратации и формирование структуры цементного камня с ультрадисперсными микронаполнителями 69](#bookmark11)

Выводы по главе 3 80

Глава 4. УСАДКА И УСАДОЧНАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ 82

з

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

камня 82

1. [Усадка и усадочная трещиностойкость бетона с ультрадисперс- ными модификаторами 96](#bookmark15)

Выводы по главе 4 111

Глава 5. ВЛИЯНИЕ АРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ОБЪЕМНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА 113

1. [Влияние вида и содержания армирующих элементов на прочность цементного камня и бетона 114](#bookmark19)
2. [Усадка цементного камня, модифицированного полиамидными волокнами 119](#bookmark21)
3. Усадка и усадочная трещиностойкость дисперсноармированного высокопрочного бетона 123

[Выводы по главе 5 128](#bookmark22)

Глава 6. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕЩИНОСТОЙКО- СТИ ДИСПЕРСНОАРИРОВАННОГО БЕТОНА ПРИ НЕРАВНОВЕСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ 130

[Выводы по главе 6 136](#bookmark23)

[ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ 137](#bookmark24)

154

[БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 141](#bookmark25)

ПРИЛОЖЕНИЯ

ВПБ — высокопрочный бетон

ВКБ — высококачественный бетон

СП - суперпластификатор

МК - микрокремнезем

СК - «бой» силикатного кирпича

**омд** - органоминеральный модификатор

УДМН — ультрадисперсный минеральный наполнитель

ВВЕДЕНИЕ

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.

Современные высокопрочные (ВПБ) и высококачественные (ВКБ) 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 и др.

Достижение высокой прочности обеспечивается за счет комплексного ис­пользования органоминеральных добавок (ОМД), содержащих в своем соста­ве высокоэффективный суперпластификатор (СП) и тонко измельченный ми­неральный наполнитель.

Широко известно использование в качестве минерального наполнителя, как в зарубежной, так и в отечественной практике производства высокопроч­ного бетона, отходов от производства ферросилиция и ферросиликохрома. Применение этих побочных продуктов, получивших в технической термино­логии название «микрокремнезем» («microsilica») или «силикатный дым» («silica lume»), и дегидратированных каолинов, обладающих пуццоланическим связыванием портландита, позволили 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. В последние годы в качестве минеральных наполнителей ВПБ предложено использовать измельченные отходы металлургической и энергетической промышленностей, кварцевые пески, известняки и кар­бонаты, доломиты, отходы от производства бетона, имеющиеся практически во всех регионах страны [40].

Из фундаментальных положений физико-химии следует, что высокодис­персные материалы с размером частиц менее 1 мкм (по устоявшейся терми­нологии - это тонкодисперсные или ультрадисперсные минеральные напол­нители (УДМН)) обладают рядом свойств, в основе которых лежат моле­кулярные процессы и явления в поверхностном слое твердой частицы. Этот класс материалов по классификации дисперсных систем находится между коллоидными (меньше 0,1 мкм) и грубодисперсными (больше 1 мкм) систе-

мами. Несмотря на то, что по гранулометрии трудно обнаружить резкую гра­ницу между частицами коллоидных, ультрадисперсных и грубодисперсных размеров, влияние их на различные процессы, может быть дифферцированы более четко. Роль этих процессов определяется высоким соотношением объема поверхностного молекулярного слоя к общему объему частицы.

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.

Получение ультрадисперсных частиц измельчением представляет важ­ную область механохимической технологии, достаточно развитой, но дорогой, т.к. технически трудно получать, сохранять и классифицировать субчастицы ввиду их высокой поверхностной энергии. Учитывая, что стоимость высокодисперсных наполнителей может быть в несколько раз выше стоимости цемента, становится актуальным поиск новых дешевых реакционно-активных порошков с низкой водопотребностью, в том числе на основе техногенных отходов, и более эффективных способов их получения.

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.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является эспериментально-теоретическое обоснование и разработка методологических и технологических аспектов направленного формирования структуры це- ментного камня и высокопрочного бетона с целью снижения усадки и повы­шения усадочной трещиностойкости путем использования комплексных ультрадисперсных органоминеральных наполнителей низкой водопотребнос- ти и микроармирующих элементов.

Дня реализации поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

* разработать методологические и технологические аспекты создания ультрадисперсных минеральных наполнителей (УДМН);
* изучить влияние вида, степени дисперсности и дозировки наполните­лей, как составной части цементной матрицы, на физико-механические свойст­ва, усадку и усадочную трещиностойкость цементного камня и бетона;
* выявить закономерности изменения объемных деформаций цементного камня и высокопрочного бетона, модифицированных УДМН, в процессе циклического многократного увлажнения и высушивания;
* экспериментально изучить усадку и усадочную трещиностойкость це­ментного камня и бетона, как при индивидуальном дисперсном наполнении, так и при комплексном двухуровневом дисперсном армировании, совместно с дисперсноармирующими волокнами;
* исследовать энергетические характеристики трещиностойкости дис- персноармированных цементного камня и высокопрочного бетона при не­равновесных механических испытаниях.

Научная новизна работы. Научная новизна работы определяется решением проблемы снижения усадки и повышения усадочной трещиностой­кости высокопрочных бетонов с использованием ультрадисперсных минеральных наполнителей низкой водопотребности на основе комбинации микрокремнезема и техногенных отходов, содержащих в своем составе кристаллические затравки из низкоосновных гидросиликатов кальция и аморфизированного SiC>2.

1. Развиты научные представления и получены количественные зависимости изменения влажностной усадки цементного камня и бетона, модифицированных

УДМН низкой водопотребности, в зависимости от рецептурно-технологических факторов с целью их регулирования и оперативного прогнозирования.

1. Впервые установлено снижение влажностной усадки цементного камня и бетона за счет введения УДМН низкой водопотребности, полученных комбинацией кристаллических затравок и готовых центров кристаллизации из гидросиликатов кальция и микрокремнезема, обеспечивающих в целом снижение начального водосодержания цементного камня и бетона и формирование высокой начальной прочности.
2. Выявлена оптимальная дозировка УДМН, обеспечивающая ми­нимальные деформации усадки и повышенную трещиностойкость це­ментного камня и высокопрочного бетона в условиях циклического насы­щения и высушивания.
3. Экспериментально выявлены зависимости в системе «рецептурно-тех- нологические факторы - параметры структуры - усадочная трещиностой­кость» цементного камня и высокопрочного бетона, как с индивидуальными наполнителями, так и в комплексе с дисперсноармирующими волокнами. Предложено математическое описание изменения деформаций усадки высо­копрочного бетона в зависимости от дозировки и длины армирующих эле­ментов. Установлено, что усадка высокопрочного бетона при относительной влажности 0 = 70-80% и в условиях сушки при 105°С описывается экспонен­циальной зависимостью.

7. Поставлены и решены оптимизационные задачи управления структу­рой бетона с многоуровневым дисперсным армированием с целью обеспече­ния трещиностойкости при неравновесных механических испытаниях. Вы­полнен анализ энергетических характеристик *К\*, As, Gif*, установлены их оп­тимальные показатели и выявлены особенности образования трещин дис- персноармированного цементного камня и высокопрочного бетона.

**Практическая значимость работы:**

* разработана лабораторная установка для получения порошков узкого гранулометрического состава, основанная на разделении частиц наполнителя в ламинарном воздушном потоке по длине трубы. Предложенный метод получения ультрадисперсных минеральных наполнителей может быть осу­ществлен в производственных и научно-исследовательских лабораториях;
* обоснована возможность эффективного использования ультрадис­персных минеральных наполнителей, в том числе на основе промышленных отходов, с целью получения высокопрочного бетона с улучшенными физико­механическими свойствами при эксплуатации их в экстремальных климатических условиях. Расширена сырьевая база минеральных добавок в цементный бетон.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссерта­ционной работы представлялись и докладывались на Международных и Все­российских научно-практических конференциях: Международных научно- технических конференциях «Композиционные строительные материалы. Тео­рия и практика» (Пенза, 2000 г., 2002 г., 2003 г.), «Проблемы энерго- и ре­сурсосбережения в промышленном и жилищно-коммунальном комплексах», (Пенза, 2003 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Актуаль­ные проблемы строительного материаловедения», (Пенза, 2003 г.),

Академических чтениях РААСН «Современные проблемы современного материаловедения». (Белгород, 2001 г., Саранск, 2002 г.).

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликовано 16 работ, в том числе 1 депонированная монография.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, основных выводов, списка использованной литературы из 163 наименований, изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит рис. 40 , табл. 21 и 3 приложения.

Автор выражает глубокую благодарность заслуженному деятелю науки и техники РФ, советнику РААСН, академику МАНЭБ, доктору технических наук, профессору В.И. Калашникову за оказанную помощь при работе над диссертацией.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основании теоретических представлений и известных экспери­ментальных данных о использовании высокодисперсных микрокремнеземов и зол в производстве высокопрочных и высококачественных бетонов пока­зана целесообразность поиска новых минеральных комбинированных ульт­радисперсных наполнителей (УДМН), характеризующихся низкой во- допотребностью, на основе техногенных отходов, возможности их получения и применения в производстве высокопрочных бетонов с целью снижения усадки и повышения усадочной трещиностойкости.
2. 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, исходя из числа Рейнольдса (Re < 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»

м Л

газобетона, 1025м /кг - «бой» силикатного кирпича и 1012 м /кг - перлит при их плотности 2,1; 2,55; 1,79 г/см3 соответственно.

1. Выполнена оценка водоредуцирующей эффективности и реологичес­кого действия С-3 в цементных суспензиях в зависимости от вида и удельной поверхности ультрадисперсных наполнителей. Установлено снижение водопотребности при совместном введении кристаллической затравки си­ликатного кирпича и микрокремнезема, взятых в соотношении 2:1 и вводимых в количестве 12,5% от массы цемента на 11%. Максимально высокий уровень понижения водопотребности Вд = 58,5% цементной суспензии достигается при введении 25% от массы цемента «боя» силикатного кирпича при его удельной поверхности *SyJl=* 1025 м2/кг.
2. Выявлено влияние высокодисперсных автоклавированных отходов, как готовых центров кристаллизации низкой водопотребности, на усадку и усадочную трещиностойкость цементного камня и бетона. Установлено значительное снижение деформаций цементного камня с УДМН. В воздушно­влажностных условиях усадка составила 0,2...0,5 мм/м, а в условиях высушивания до полного удаления адсорбционно-связанной воды уменьшилась соответственно на 40, 39, 48 и 50% для цементного камня, модифицированного порошком «боя» силикатного кирпича, смеси порошка из силикатного кирпича и микрокремнезема БС-120, отходом от срезки «горбуши» газобетона и пер­литом.
3. Исследована усадочная трещиностойкость цементного камня модифици­рованного УДМН в результате многократного циклического «насыщение в воде - высушивание». 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 - отхода от срезки «горбуши» газобетона, перлита 0,12 мм. С увеличением дисперсности ширина раскрытия трещин уменьшилась на 6-12%.
4. 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 течении 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 образование трещин не наблюдалось.
5. 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 превышала 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.
6. На основании теоретических представлений об эффективных средствах повышения прочности на растяжение исследовано влияние полиамидного волокна в качестве армирующего элемента. Выявлено, что максимальная суточная прочность фибробетона, достигавшая 31,4 МПа обеспечивалась на волокнах длиной 6мм при их дозировке 1,0 кг/м3 бетона. Прочность бетона с волокнами длиной 12 и 18 мм составляла соответственно 26,4 и 20,4 МПа, превышая в то же время 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 увеличивалась в среднем 11-13%.
7. Экспериментально выявлены зависимости в системе «рецептурно­технологические факторы - усадка и усадочная трещиностойкость» при ар­мировании цементного камня и высокопрочного бетона как индивидуально на отдельных структурных уровнях, так и при комплексном двухуровневом дисперсном армировании на макро- и микроуровнях. Установлено снижение деформаций усадки цементного камня с введением волокна при индивиду­альном армировании. В воздушно-влажностных условиях деформации усад­ки составили 0,4 мм/м, а в условиях полной сушки при 105°С - 1,25 мм/м. Предложено математическое описание изменения деформаций усадки вы­сокопрочного бетона в зависимости от дозировки и длины армирующих

элементов экспоненциальной зависимостью.

1. Выявлено снижение усадки при комплексном дисперсном двухуров­невом армировании бетона. Усадка дисперсноармированного бетона волок­нами длиной 6 и 12 мм составила 0,08, 0,1 мм/м при 0 = 70-80% и 0,14, 0,23 мм/м - 0=5-10%. В условиях полной сушки деформации усадки достигли 0,38, 0,47 мм/м, что на 22 и 27% ниже усадки контрольного значения. Максимальное снижение усадочных деформаций обеспечивается при исполь­зовании смеси силикатного кирпича и микрокремнезема БС-120, в со­отношении 2:1 и полиамидного волокна.
2. Применение комплексного армирования высокопрочных бетонов позволило существенно повысить его трещиностойкость. Ширина раскрытия трещин дисперсноармированного бетона составила 0,025 мм, при исполь­зовании волокна длиной 12 и 0,2 мм - длиной 6 мм. Применение многоуровневого дисперсного армирования структуры бетона на микро- и макроуровнях являются эффективным технологическим приемом получения бетонов с более широкими их функциональными возможностями.
3. Изучены энергетические характеристики армированного бетона при неравновесных механических испытаний. Установлено, что суммарная плотность энергии АЭ для дисперсноармированного бетона составляет 0,15- 0,22 В2см-2, а для контрольного бетона - достигает 0,24 В2-см~2. Критический коэффициент интенсивности напряжения *К*\* дисперсноармированного высо­копрочного бетона достигает максимального значения 1,57 МПа-м0,5 при длине волокна - 6 мм и 1,97 МПа-м0,5 - 12 мм, что свидетельствует о высокой трещиностойкости фибробетона.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Адлер И., Гутч В. Исследование свойств суперпластификатора BETOCRETE // Экспресс-информация. Вып.№3. 2000. С.27-29.
2. Александровский С.В. К итогам Международного симпозиума по усадке бетонов // Бетон и железобетон. 1968. №11. С. 8-9.
3. Александровский С.В. Некоторые особенности усадки бетона // Бетон и железобетон. 1959. №10. С.8-10.
4. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на температурные и влажностные воздействия. М.: Стройиздат, 1966.425 с.
5. Александровский С.В. Экспериментально-теоретические исследова­ния усадочных напряжений в бетоне. Стройиздат, 1965.285 с.
6. Александровский С.В., Багрий В.Я. Ползучесть бетона при периоди­ческих воздействиях внешней среды. М.: Стройиздат, 1970. 166 с.
7. Ананенко А.А. Влияние условий хранения образцов на деформа- тивные свойства бетонов, изготовленных на цементах разного состава // Известия вузов. 1999. №9. С. 43-46.
8. Ананенко А.А. О расчетных и фактических величинах предельной относи­тельной деформации усадки бетона // Тр. НИИЖТа. Новосибирск, 1970. С. 80-92.
9. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.: Гостехтео- ретиздат, 1952. 206 с.

Ю.Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. М.: Госстройиздат, 1961. 162 с.

П.Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.

1. Баженов Ю.М., Фаликман В.Р. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии // Мат 1 Всероссийской конференции по бетону и железо­бетону. М.: 2001. С. 91-101.
2. Бакстер С., Майер С. Бетон с заполнителем из стеклянного боя // Эксп­ресс-информация. Вып. №6.2002. С 30-32.
3. Батраков В.Г. Модификаторы бетона - новые возможности // Мате­риалы 1 Всероссийской конференции по бетону и железобетону. М., 2001. С. 184-197.
4. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. М.: Стройиздат, 1998. 768 с.
5. Батраков В.Г., Каприелов С.С., Иванов Ф.Н., Шейнфельд А.В. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств, как добавок в бетон // Бетон и железобетон. 1990. №12. С. 15-17