

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

2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005
Тел: (812) 400-06-67 Факс: (812) 316-58-72; rector@spbgasu.ru; www.spbgasu.ru
ОКПО 02068580; ОГРН 1027810225310; ИНН / КПП 7809011023/783901001

№ _____
На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ



И.В. Дроздова

«20» сентября 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Аль Дулайми Салмана Давуд Салманана

**«Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные
микробиологической добавкой», представленную
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия**

Структура и объем работы

Для отзыва представлены автореферат диссертации на 30 страницах и диссертация, состоящая из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и 4 приложений. Диссертационная работа изложена на 281 странице машинописного текста, включающего 37 таблиц, 100 рисунков, список литературы из 368 наименований, приложения представлены на 28 листах.

Актуальность темы исследований

Цементные бетоны в условиях эксплуатации могут подвергаться растрескиванию в результате силовых нагрузок и резких переменчивых неблагоприятных факторов внешней среды. Процесс разрушения бетонов начинается, как правило, с появления микротрещин, которые, увеличиваясь в размерах, снижают прочностные характеристики материала и, соответственно, сроки эксплуатации зданий и сооружений. В конечном итоге, развитие трещин может приводить к полному разрушению материала и конструкции в целом. Для увеличения сроков службы конструкций важно снизить распространение и рост трещин в бетоне. Поэтому ученых возникла идея создания так называемых

самовосстанавливающихся бетонов, обладающих функцией «самозалечивания» микротрещин.

Из научно-технической литературы известно, что рядом исследователей было установлено, что самовосстановление структуры бетонов может быть достигнуто путем введения в бетонную матрицу бактерий, способных вырабатывать соединения кальция. Введенные в бетонную матрицу и находящиеся в состоянии покоя споры продуцирующих кальций бактерий, не потерявшие свою жизнеспособность, становятся активными при попадании влаги через образованные трещины в бетоне. В результате жизнедеятельности таких видов бактерий, обладающих способностью к образованию соединений кальция, в бетоне происходят процессы «заливания» микротрещин.

В этой связи диссертационная работа Аль Дулайми Салмана Давуд Салмана, посвященная изучению процессов самозалечивания микротрещин в цементных бетонах, разработке составов бетонов с микробиологическими добавками и изучению их физико-технических характеристик, является весьма актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В диссертационной работе выполнены исследования по разработке технологии получения бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, исследованию жизнеспособности спор внедренных в бетон бактерий и их выживаемости в цементной среде, изучению процесса устранения микротрещин в бетоне и восстановлению прочностных характеристик бетонов, определению физико-технических свойств восстановленных бетонов.

Научные положения, выводы и рекомендации, которые представлены в диссертации, основываются на основных законах химии, биологии, физико-химической механики и строительного материаловедения. В работе автором использованы передовые и современные методы, научные приборы и соответствующее целям и задачам исследовательское оборудование.

Анализ результатов, полученных автором при выполнении исследований показал следующее.

Выбор и расширение известной номенклатуры модифицирующих компонентов, используемых для повышения качества бетонов и цементных композитов, подбор и оптимизация эффективных составов модифицированных бетонов позволил автору получить самовосстанавливающиеся цементно-песчаные и бетонные материалы, обладающие повышенной долговечностью. В итоге Аль Дулайми Салманом Давуд Салманом разработаны и предложены новые составы модифицированных микробиологической добавкой бетонов. По результатам исследований поданы заявки на получение патентов и свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ.

Автором диссертационной работы – Аль Дулайми Салманом Давуд Салманом показано, что результаты исследований бетонов, модифицированных

микробиологической добавкой, могут быть использованы при изготовлении самовосстанавливающихся бетонных конструкций, а также в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению 08.03.01 – Строительство.

Анализ содержания диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приведен обзор научно-технической литературы российских и зарубежных ученых в области структурообразования, технологий изготовления, оптимизации составов, долговечности и рациональных областях применения бетонов и других цементных композиционных материалов. Для изготовления бетонных изделий и железобетонных конструкций чаще всего используются бетоны общего назначения, а также фиброармированные и модифицированные.

Приведены результаты исследований высококачественных бетонов Российскими и зарубежными специалистами. Мировым научным сообществом в 1986 г. была сформулирована концепция высоко-функциональных, высококачественных бетонов. Под такими бетонами понимают бетоны, соответствующие специальным требованиям к функциональности и универсальности.

В то же время из научной и технической литературы известно, что бетонные и железобетонные конструкции склонны к растрескиванию. Трешины в бетонных изделиях и конструкциях могут возникать на стадии эксплуатации под воздействием внешних факторов, таких, как, например, экстремальные нагрузки, ошибки конструирования, неправильный порядок производства строительных работ и др. Микротрешины обусловливают преждевременное разрушение бетона, коррозию арматуры, что, в свою очередь, снижает срок службы строительных конструкций и сооружений.

Рассмотрены и проанализированы способы восстановления работоспособности железобетонных конструкций, имеющих трещины, методами наращивания, пропитки структуры бетона полимерными композициями, а также нанесения монолитных покрытий или приклеивания металлических, полимерных и других элементов.

Показано, что для разработки бетона, способного самостоятельно восстанавливаться и устранять повреждения, существует определенный стимул в виде экономической выгоды за счет снижения затрат на ремонты и восстановление работоспособности конструкций. Приведены характеристики известных самовосстанавливающихся бетонов, получаемых с помощью химических и биологических технологий. Приведены и проанализированы выполненные ранее экспериментальные исследования процесса устранения трещин с помощью инкорпорированных бактерий, особенности процесса самовосстановления бетона. Отмечено, тем не менее, что в настоящее время не

достигнут существенный качественный прорыв в области самовосстановления бетонов.

Во второй главе дано описание объектов и методов исследований, приводятся основные сведения об использованных материалах и экспериментальных научных методах.

При выполнении исследований использовались обычные, а также фиброармированные и модифицированные бетоны. Для изготовления образцов цементных композитов использованы сырьевые материалы зарубежного производства, удовлетворяющие требованиям соответствующих стандартов: портландцемент общего назначения, наполнитель – зола уноса, водоредуцирующая добавка, дисперсная арматура на основе поливинилового спирта. В качестве мелкого заполнителя для обычных цементных растворных смесей использован песок с модулем крупности $M_k = 2,45$; для модифицированных смесей – с $M_k = 1,56$.

Для получения самовосстанавливающихся бетонов использовали способные вырабатывать соединения кальция бактерии вида *Sporosarcina ureae*, *Sporosarcina pasteurii* и подвид *Bacillus subtilis* – *Spizizenii*; в качестве носителей бактерий использован перлитовый песок и пемза с размерами частиц, соответственно, 0,4–1,4 и 0,1–0,3 мм. В качестве питательной среды бактерий применяли лактат кальция, мочевину и дрожжевой экстракт.

Для исследования бетонов, модифицированных микробиологической добавкой и процессов самовосстановления, применяли следующие методы: методы оценки трещин в бетоне, оценки роста бактерий, их спорообразующей способности и выживаемости, оценки роста кристаллов в микротрещинах, анализ прочности образцов, испытания и визуальное отображение процесса самовосстановления бетона, численное моделирование процесса самовосстановления. Для изучения процессов, происходящих в бактериальных бетонах, использовали оптическую спектроскопию, электронную микроскопию, физико-механические методы анализа и другие испытания. Для проверки качества самовосстановления использовали метод испытания на водопроницаемость и акустическую эмиссию. Моделирование характеристик процесса самовосстановления бетона выполнено по изменениям прочности, сорбционной способности, проникающей способности хлоридов и скорости ультразвука в образцах бетона с инкорпорированными бактериями, применены методы статического анализа и анализа экспериментальных данных.

В третьей главе приведены теоретические предпосылки получения самовосстанавливающихся бетонов и даны объяснения механизмов, происходящих при «заличивании» трещин, также приведены механизмы осаждения кальцита микробиологического происхождения и установлены группы микроорганизмов, обладающие способностью вырабатывать карбонат кальция.

Для реализации механизма бактериального самовосстановления бетонов необходимыми условиями являются: наличие внутри системы жидкой фазы, то есть, наличие воды, наличие в достаточном количестве химических веществ –

карбонат- и бикарбонат-ионов и растворенных ионов кальция, трещина должна находиться в стабильном состоянии, ширина трещины должна быть постоянной, менее 150 мкм, предпочтительно даже менее 50 мкм, давление воды должно быть не слишком высоким, что зависит от соотношения напора воды и толщины элементов структуры бетона.

Показано, что бактерии должны быть в состоянии действовать как своеобразные катализаторы реакции гидролиза мочевины, а также выдерживать механические нагрузки и выживать в условиях высокой плотности среды. Рассмотрены основные биологические и химические аспекты структурообразования и получения бетонов, модифицированных микробиологической добавкой.

В четвертой главе приведен анализ количественной оценки процесса самовосстановления результатов собственных экспериментальных исследований, проведенных на образцах обычного и фиброармированного цементного раствора, а также модифицированных цементных композитов. Описаны полученные результаты по оценке способности отобранных бактерий сохраняться и выживать, расти в среде бетона и образовывать споры. Показано, что три вида отобранных бактерий хорошо росли на питательной среде. Методом оптической микроскопии выявлена высокая выживаемость бактерий в условиях повышенных температур (до 65 °C) и щелочности (до pH 10). Установлена высокая уреазная активность, имеющая значение для выработки карбонат-ионов, необходимых для образования осадка карбоната кальция (бактерии вида *Sporosarcinaureae* и *Sporosarcinapasteuri*).

Выявлено, что фиксация бактерий в среде-носителе – цеолите и пемзе позволила получить значительный положительный эффект при нахождении бактерий в цементном молочке с высоким показателем pH. Такая искусственная среда была создана для имитации реальной среды с высоким значением pH внутри бетона.

Определение сорбционной способности, экспресс-определение химической проницаемости, измерение скорости ультразвуковых пульсов и испытания на сжатие и изгиб образцов бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, показали, что их прочность несколько выше контрольных образцов при установленной концентрации бактерий на уровне 10^6 кл/мл, что справедливо для всех рассмотренных видов бактерий.

После выбора оптимальной концентрации компонентов бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, лучшие результаты были использованы во всех последующих экспериментах. В этой главе представлен также подробный анализ и обсуждение полученных результатов по оценке процесса самовосстановления бетона. Фотографические изображения процесса «заличивания» трещин, обработанных бактериями у модельного образца и у контрольного после 4-х месяцев экспозиции показывают, что некоторые из трещин частично заполнены карбонатом кальция, а некоторые (более мелкие) – полностью заполнены. При этом в контрольном образце заживление трещин не обнаружено.

Методом энергетической дисперсной спектроскопии подтверждено, что образовавшийся осадок в трещинах состоит во всех случаях из трёх активных элементов: С, О и CO₂, то есть, можно предположить, что основой минеральных осадков является карбонат кальция – CaCO₃.

Эффективность самовосстановления подтверждена на образцах – модифицированных цементных композитах нового поколения, в которых искусственно создавалось множество узких трещин. Бактерии видов *Spasteuri* и *B. Subtilis* являются идеальным выбором для самовосстановления таких бетонов. Исследования с помощью растрового электронного микроскопа подтвердили, что трещины шириной до 0,16 мм полностью заполнялись кристаллами CaCO₃.

В пятой главе приводятся оптимизационные исследования рецептурных и технологических факторов при моделировании характеристик процесса самовосстановления в образцах обычного и фиброармированного цементного раствора с инкорпорированными бактериями методом статистического анализа и анализа экспериментальных данных. Для этого автором был использован метод планирования эксперимента – полнофакторный план типа 3³ 2². Статистический анализ данных был проведен с целью моделирования влияния основных параметров (длительность восстановления, виды бактерий и типы материалов-носителей) на характер изменения свойств образцов с микротрещинами из фиброармированного цементного раствора в ходе процесса самовосстановления, т.е. – «самозалечивания».

Для оценки эффективности самовосстановления рассмотрены такие отклики/свойства, как проникающая способность хлорид-ионов, сорбционная способность, скорость ультразвукового импульса и прочность на сжатие. Для планирования экспериментов и анализа полученных данных использовали программное обеспечение MINITAB.

Показано, что полученные с использованием метода планирования эксперимента статистические модели пригодны для прогнозирования характеристик самовосстановления в отношении рассмотренных показателей. Статистическое моделирование результатов лабораторных экспериментов позволило установить значения концентраций, которые не рассматривались в ходе экспериментального исследования и зафиксировать взаимовлияние параметров.

В шестой главе приводятся данные о разработанных в итоге производственных составах, сведения о внедрении результатов исследования и технико-экономической эффективности разработки. Приведены рекомендуемые для применения на практике составы бетонов модифицированных микробиологической добавкой на основе стандартных материалов для бетонов общего назначения, а также фиброармированных и модифицированных цементных композитов.

Показана экономическая эффективность строительных материалов с бактериальными добавками, обеспечивающими повышенную долговечность материалов и изделий.

В заключении представлено краткое описание научно-исследовательского

проекта. Проведены конечные результаты и выводы проведенного исследования, даны рекомендации для будущих изысканий.

Научная новизна работы

1. Выявлены основные закономерности влияния микробиологической добавки, включающей в своем составе бактерии, питательную среду и носителя бактерий на свойства бетонов и процессы самовосстановления трещин в бетонных конструкциях.

2. Определены с помощью физико-химических и биологических методов исследований выживаемость, рост, способность формирования кристаллов карбоната кальция, спорообразование продуцирующих соединения кальция бактерий в условиях повышенных температур и щелочности среды в бетоне.

3. Установлено влияние исследованных и предложенных видов добавок (бактерий, компонентов их питательной среды и носителей) – элементов самовосстановления микротрещин на прочностные свойства бетонов различных типов.

4. Определена эффективность «самозалечивания» трещин в бетонных образцах посредством оценки прочности на сжатие и изгиб, скорости распространения ультразвукового импульса, сорбционной и проникающей способности хлорид-ионов.

Теоретическая и практическая значимость работы

В диссертации изложены научно-обоснованные технические, экономические и технологические решения получения составов бетонов, модифицированных комплексной микробиологической добавкой (бактерий, компонентов их питательной среды и носителей) с целью самовосстановления поврежденных микротрещинами бетонных изделий и конструкций. Показана их эффективность для «самозалечивания» микротрещин размерами до 150 мкм.

1. Разработаны принципы получения и применения бетонов, модифицированных комплексной микробиологической добавкой для изготовления бетонных изделий и конструкций со свойствами «самозалечивания» микротрещин.

2. Выявлены оптимальные режимы изготовления самовосстанавливающихся бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, позволяющие повысить прочность цементных композитов в возрасте 28 суток более чем на 27 %.

3. Предложены составы бетонов общего назначения, фиброармированных и модифицированных композитов, включающих матрицы различных составов, с добавками бактерий, их носителей и питательных сред.

Методология и методы исследования

Достоверность результатов, научных выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечиваются большим объемом экспериментальных данных, полученных современными и стандартными методами испытаний образцов и исследований характеристик строительных материалов, в том числе: растровой электронной микроскопии (СЭМ), энергодисперсионной спектроскопии (EDS), рентгеноструктурного анализа (HRD), анализа и корреляции экспериментальных результатов, полученных разными независимыми методами и статистической обработкой результатов испытаний, сходимостью полученных теоретических результатов с данными экспериментов, аprobацией полученных результатов исследований на научно-технических конференциях различного уровня.

Рекомендации по дальнейшему использованию результатов и выводов диссертации

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании бетонных конструкций и сооружений с повышенной микротрециностойкостью и более длительным при этом сроком службы.

Результаты исследований прошли аprobацию на ряде научно-технических конференций и рекомендованы к внедрению Министерством строительства, транспорта и дорожного хозяйства Республики Мордовия.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в лекционных, лабораторных и практических занятиях по дисциплине «Строительные материалы» для подготовки бакалавров и магистров:

– по направлению 08.03.01 – строительство в ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева»;

– в «Технологическом институте» (г. Багдад) Министерства высшего образования и научных исследований Республики Ирак.

Следует считать, что полученные диссидентом результаты имеют перспективы дальнейшего использования. В этом отношении есть основания согласиться с предложениями, рассмотренными в диссертации.

Замечания по диссертационной работе

1. Из диссертационных исследований не ясно, как влияют различные условия твердения предложенных автором модифицированных комплексной биодобавкой бетонов (в водных условиях, при термовлажностной обработке и т.д.) на их технические свойства и эксплуатационные характеристики, в том числе, на долговечность.

2. В общей технологической цепочке изготовления бетонов, модифицированных комплексной микробиологической добавкой, следовало бы более конкретно и детально описать блок по изготовлению комплексной бактериальной добавки, включающей питательную среду и носитель.

3. В диссертационной работе следовало бы предложить методы контроля самовосстановления бетонных конструкций, изготовленных с применением бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, в реальных эксплуатационных условиях.

4. Автор подчеркивает, что предложенный метод самовосстановления эффективен для «заличивания» трещин, шириной не более 150 мкм, при этом не даёт никаких рекомендаций по контролю размеров трещин, реально возникающих в бетоне при эксплуатации, не понятно поведение более широких трещин в этих условиях.

5. В диссертации следовало бы привести детальную технологическую схему и перечень технологического оборудования, выпускаемого в России и за рубежом, которое можно было бы использовать для изготовления бетонов, модифицированных микробиологической добавкой.

6. Автор рекомендует свою разработку, в том числе, и для железобетонных строительных конструкций, при этом нет данных о влиянии комплексной микробиологической добавки на коррозию металлической арматуры в бетоне.

7. Диссертация перегружена множеством сведений и данных, взятых из литературных источников, не имеющих прямого отношения к работе и проводимым исследованиям, особенно, в части, касающейся биологических аспектов процесса. В то же время, в работе уделено недостаточно внимания исследованиям физико-химических процессов формирования цементного камня в присутствии комплексной бактериальной добавки. Не исследована длительная коррозионная стойкость предложенных составов бетона и цементного композита, отсутствуют климатические испытания.

Соответствие диссертации и автореферата Положению о присуждении ученых степеней

В диссертационной работе Аль Дулайми Салманом Давуд Салманом получены новые научные данные и интересные для строительной отрасли результаты исследований. В диссертации содержатся предлагаемые автором технические решения и рекомендации, обладающие научной новизной и практической значимостью. Личный вклад соискателя в получении достоверных научных данных не вызывает сомнений. Текст диссертации написан достаточно грамотно техническим языком, графический материал выполнен на хорошем уровне. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертационной работы.

В соответствии с п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. с изменениями, внесенными постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2014 года № 723, постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 года № 335, постановлением Правительства Российской Федерации от 2 августа 2016 года № 748, постановлением Правительства Российской Федерации от 29 мая 2017 года №

650, постановлением Правительства Российской Федерации от 28 августа 2017 года № 1024, постановлением Правительства Российской Федерации от 1 октября 2018 года № 1168) диссертационная работа Аль Дулайми Салмана Давуда Салмана оценивается как научно-квалификационная работа. Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Аль Дулайми Салмана Давуд Салмана, представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение научной задачи, имеющей важное значение для строительной отрасли, удовлетворяет требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор – Аль Дулайми Салман Давуд Салман, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия.

Отзыв на автореферат диссертации и на диссертационную работу обсужден и одобрен на заседании кафедры технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), протокол № 2 от «13» сентября 2019 г.

Профессор кафедры технологии
строительных материалов и метрологии,
доктор технических наук по специальности
05.23.05 – Строительные материалы и изделия,
профессор
«13 » сентября 2019 г.

Матвеева Лариса Юрьевна

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
Адрес: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4
E-mail: rector@spbgasu.ru
Тел.: +7 (812) 575-05-34