

ОТЗЫВ

официального оппонента Красильниковой Ирины Александровны
на диссертационную работу Данилова Дмитрия Юрьевича на тему:
«Модифицированный бетон повышенной сульфатостойкости»,
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических
наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия

Актуальность темы диссертационного исследования

Тематика диссертационного исследования Данилова Дмитрия Юрьевича, посвящённая разработке модифицированных бетонов с повышенной сульфатостойкостью, без сомнений, актуальна. Как справедливо отмечает соискатель во введении, «снижение долговечности бетонных конструкций является одной из основных проблем в практике современного строительства». Существующие эффективные решения, помогающие противостоять развитию коррозии бетона, в основном ориентированы на высокомарочные бетоны, в то время как вопросы защиты широко распространённых бетонов низких классов прочности с малым расходом вяжущего остаются недостаточно изученными.

Актуальность работы многократно усиливается тем обстоятельством, что растущая агрессивность окружающей среды, обусловленная антропогенной деятельностью, усугубляет эти процессы, что требует разработки эффективных мер защиты строительных изделий и конструкций на основе бетонов, в том числе и низких классов прочности с ограниченным расходом вяжущего, на долю которых приходится около 30% от общего производства. Традиционные подходы, основанные на повышении расхода цемента, не всегда экономически оправданы для рядовых строительных конструкций, что формирует явное противоречие между требованиями долговечности и экономической целесообразности.

Не менее важным аспектом актуальности является методологическая составляющая работы. Существующие традиционные методы исследований коррозионного повреждения бетона достаточно длительные и трудоемкие, они проводятся в лабораторных условиях с использованием большого количества испытуемых образцов, больших объемов периодически сменяемых агрессивных растворов, что создает определенные трудности при проведении исследований. В этой связи особый потенциал имеет ультразвуковая диагностика, которая, несмотря на успешное применение для оценки дефектов и свойств бетона, практически не используется для исследования кинетики коррозии бетона. Разработка рациональных способов обеспечения долговечности цементного бетона с ограниченным расходом вяжущего и необходимость

совершенствования методик испытаний коррозионной стойкости определяют безусловную актуальность настоящего исследования.

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

Автором изучен современный уровень развития науки в области коррозии бетона, что позволило проанализировать достижения в данной области, сформулировать цель работы и решаемые для её достижения задачи. В работе реализован комплексный методологический подход, включающий анализ мирового научного опыта, разработку способов решения поставленных задач, проведение экспериментов и интерпретацию полученных результатов с выявлением ключевых закономерностей и формулировкой рекомендаций для дальнейших изысканий. Использовалось современное высокотехнологичное оборудование, а также методы испытаний и анализа, соответствующие требованиям отечественных и международных стандартов. Применялись методы математической и статистической обработки результатов.

Для всестороннего изучения свойств и характеристик представленных образцов был применён комплекс современных аналитических методов. Экспериментальная часть исследования включала как разрушающие, так и неразрушающие методы контроля, что позволило получить исчерпывающие данные о механических свойствах и структурной целостности материала. Для углубленного анализа микроструктуры, морфологии новообразований и фазового состава использовались методы растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Такой комплексный подход обеспечил получение достоверных и взаимодополняющих результатов.

При проведении испытаний коррозионной стойкости цементных систем соискатель обоснованно опирался на принцип подобия лабораторных и реальных условий. Разработанная автором методика ультразвуковой диагностики кинетики коррозии базируется на физически обоснованных представлениях о распространении ультразвуковых волн в неоднородной упругой среде.

Все вышеизложенное позволяет констатировать, что основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной мере обоснованы.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность полученных диссертантом теоретических и экспериментальных положений обеспечена проведением исследований с

использованием современных методов на аттестованном оборудовании в соответствии со стандартными и специализированными методиками испытаний, а также сопоставимостью полученных результатов с основными положениями и данными фундаментальных наук. Полученные результаты согласуются с устоявшимися научными представлениями и хорошо соотносятся с данными, опубликованными другими авторами.

Научная новизна диссертационной работы Данилова Дмитрия Юрьевича заключается в следующем.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение коррозионностойких бетонов с низким содержанием цемента. Выявлены причины повышения коррозионной стойкости: физический фактор обусловлен уплотнением структуры цементной матрицы бетона за счет снижения водоцементного отношения (на 24–44%) путем применения суперпластификатора и минеральных модификаторов (40–70% от массы цемента); химический фактор связан с ослаблением химического взаимодействия цементного камня с агрессивной средой за счет сокращения содержания алюминатной фазы и свободного гидроксида кальция. Установлена функциональная взаимосвязь между дозировками наполнителей, видом агрессивной среды и коэффициентами стойкости бетона.

Уточнен механизм сульфатной и сульфатно-магнезиальной коррозии, предложены зональные модели послойного разрушения бетона. Продвижение зоны сульфатной коррозии вглубь бетона с инертными минеральными добавками сопровождается изменением морфологии кристаллов этtringита от тонковолокнистого до игольчатого, что обусловлено: повышением концентрации гидроксида кальция в жидкой фазе бетона и снижением растворимости гидроалюминатных фаз; снижением интенсивности поступления сульфат-ионов в зону реакции и длительностью процессов. Повышение дозировки активной минеральной добавки золы-уноса приводит к уменьшению размеров волокнистых кристаллов этtringита и снижению кристаллизационного давления, что способствует уменьшению глубины корродированного слоя.

Доказана целесообразность применения для прогнозирования и оценки долговечности бетона метода ультразвуковой диагностики, позволяющей исследовать кинетику коррозии бетона в агрессивных средах. Установлено, что положительная динамика роста скорости прохождения ультразвукового сигнала в корродированных образцах на начальном этапе связана с процессами гидратации и коагуляцией пор бетона продуктами коррозии, а дальнейшее снижение скорости обусловлено доминированием эффекта разрушения (микротрещинообразования) над эффектом уплотнения. В качестве критерия целесообразно использовать интервал времени от начала испытаний до момента

стабильного снижения скорости УЗ-сигнала; чем медленнее протекает коррозия, тем длительнее период до сброса скорости.

Исследования проводились с применением современных физико-химических методов, позволяющих получать достоверные экспериментальные данные, включая растровую электронную микроскопию высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU с энергодисперсионным спектрометром, рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL 9900 WorkStation, измеритель ультразвука «Пульсар-2.2» и гидравлический пресс ПГМ-100МГ4. Всё это свидетельствует о достаточно высоком уровне проведённых автором теоретических и экспериментальных исследований и достоверности полученных результатов.

Значимость полученных автором результатов для науки и практики

Теоретическая и практическая значимость работы определяется её востребованностью и завершённостью. Дополнены теоретические представления о механизмах сульфатной и сульфатно-магнезиальной коррозии. Представлены зональные модели поэтапного развития коррозии, выявлены морфологические особенности основных продуктов коррозии. Получены новые эмпирические данные о стадиях и формах основного продукта сульфоалюминатной коррозии – этtringита и дано их теоретическое обоснование. Показана зависимость морфологии кристаллов этtringита от условий образования: вида агрессивного носителя, активности минерального наполнителя и глубины осаждения в корродированной зоне.

Разработана и апробирована методика исследования кинетики коррозии цементных композитов посредством ультразвуковой диагностики, что позволяет снизить трудоемкость исследований и получить более полные данные о кинетике разрушения бетона под воздействием агрессивных сред в комплексе с традиционными методами испытаний, и на этой основе выбирать стойкие составы. Установлены и обоснованы закономерности влияния коррозионных процессов на динамику скорости ультразвуковых импульсов. Разработаны рекомендации по математической обработке данных УЗ-диагностики.

Практическая значимость подтверждается тем, что разработаны и апробированы рецептуры коррозионностойких модифицированных бетонов со сниженным расходом вяжущего за счет усиления водоредуцирующего действия суперпластификаторов путем введения различных минеральных наполнителей (взамен заполнителей), что сопровождается увеличением плотности, прочности и коррозионной стойкости. Разработанные составы модифицированного бетона не требуют принципиального изменения стандартной технологической схемы производства, что облегчает производство в промышленных условиях. Показано,

что экономический эффект заключается в повышении долговечности конструкций и снижении затрат на их ремонт и восстановление впоследствии.

Внедрение результатов исследований подтверждается разработкой стандарта организации СТО 02066339-082-2025 и технологического регламента на производство порошково-модифицированного бетона с повышенной коррозионной стойкостью. С ООО «ЭрионСтройГрупп» подписан протокол о намерениях производства порошково-модифицированного бетона с повышенной коррозионной стойкостью. Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе при чтении курсов лекций «Вяжущие вещества», «Долговечность строительных конструкций» для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Строительство» (08.03.01-05 и 08.04.01).

Общая характеристика работы

Диссертация выполнена в классическом стиле. Диссертационная работа включает введение, шесть глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 187 страницах машинописного текста, содержит 27 таблиц, 77 рисунков, список литературы из 181 источника.

Во введении обоснована актуальность темы, показана степень её проработанности. Сформулированы цели, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Приведены защищаемые положения, аргументы достоверности выводов, сведения об апробации и внедрении.

В первой главе приведен обзор научно-технической литературы, посвященной вопросам продления ресурса бетонных изделий и конструкций. Проанализированы способы повышения стойкости бетонов к агрессии, роль модификаторов, критерии выбора вяжущего и применяемые методы исследований коррозионной стойкости.

Во второй главе описаны методы экспериментальных исследований и характеристики сырья. Использован комплексный подход: сочетание стандартных разрушающих методов с неразрушающей ультразвуковой диагностикой, а также микроструктурным и фазовым анализом (РЭМ, РФА).

Третья глава посвящена разработке и применению УЗ-диагностики для исследования кинетики коррозии бетона. Впервые показано на длительном интервале времени (до 24 мес), что динамика скорости УЗ-сигнала информативно отражает стадии коррозии в растворах Na_2SO_4 и MgSO_4 . Проведено сопоставление кинетики УЗ-параметров с результатами прочностных испытаний и разная «детерминированность» по сериям с разным расходом цемента. Предложен индикатор УЗ-диагностики (время до стабильного снижения скорости) и обоснована его физическая интерпретация, как показателя

перехода доминирования от эффектов кольматации/уплотнения к деструкции; показана воспроизводимая связь с прочностной деградацией и $K_{ст}$.

Четвертая глава посвящена повышению коррозионной стойкости бетонов с низким расходом вяжущего путем модифицирования минеральными наполнителями и ПАВ. Установлена зависимость эффективности карбонатных и кремнеземистых наполнителей в зависимости от вида агрессивной среды (растворы Na_2SO_4 и $MgSO_4$), выделены работоспособные диапазоны дозировок минеральных добавок под конкретный тип агрессии. Уточнен механизм сульфатной и сульфатно-магнезиальной коррозии. Предложены и верифицированы зональные модели послойной деградации с привязкой к типичным продуктам коррозии ($CaCO_3$, $Mg(OH)_2$, гипс, гидросульфоалюминаты, MSH), что повышает научную ценность диагностики и способствует совершенствованию методик оценки глубины повреждений. Для аппроксимации кинетических кривых предложено использовать полиномиальные функции (для агрессивных сред) и степенные (для водного твердения).

В пятой главе приводятся результаты исследований коррозии бетонов, модифицированных добавками золой-уноса и рециклированного бетона, а также сравнительный анализ результатов проведенных исследований. Соискателем показано, что конструирование состава композита (тип/дозировка наполнителя + СП) позволяет замедлить развитие коррозии бетонов с низким содержанием вяжущего, обеспечив превосходство по долговечности над стандартными, более цементными системами. При этом установлен рейтинг наполнителей в зависимости от среды (р-р Na_2SO_4 : зола > известняк > кварц; р-р $MgSO_4$: известняк > зола > кварц). Показано, что замедление коррозии обусловлено совокупным влиянием ряда факторов: снижения В/Ц при помощи СП и ввода наполнителей, уменьшения C_3A и трансформации морфологии этtringита.

В шестой главе приведена технологическая схема производства модифицированных бетонных смесей и технико-экономический расчёт, подтверждающий эффективность предлагаемых решений. Ключевым преимуществом является пролонгированная экономия, обусловленная продлением межремонтного срока службы конструкций, снижением затрат на восстановительные работы и сокращением простоев производственных объектов в связи с ремонтами. Полученный совокупный эффект делает результаты значимыми для предприятий ЖБИ и инфраструктурных объектов, эксплуатируемых в сульфатно-агрессивных условиях.

В заключении автор формулирует научные выводы и основные результаты, которые подтверждают исходную рабочую гипотезу и позволяют решить поставленные задачи. Также даются рекомендации и обозначаются направления для дальнейших исследований по данной теме.

Оценка публикаций автора

По материалам диссертации опубликовано 12 статей, в том числе: 4 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ. Получен 1 патент на изобретение. Публикации в полном объеме отражают основные положения диссертационной работы Данилова Д.Ю.

Замечания по содержанию и оформлению диссертационной работы

1. В тексте и выводах используется формулировка «зональные модели послойного разрушения», однако фактически приведены схемы зонирования с описанием продуктов коррозии. Для использования термина «модель» необходимо либо формализовать представленные закономерности математически/алгоритмически, либо заменить формулировку на «схемы» или «концептуальные представления».

2. Автор предлагает «зональные модели послойного разрушения» (рис. 4.28 и др.). Однако эти модели представлены лишь как графические схемы с указанием продуктов коррозии. С точки зрения математического моделирования коррозионных процессов, было бы необходимо описать кинетику продвижения фронта коррозии через изменение эффективного коэффициента диффузии сульфат-ионов в каждой из выделенных зон. Как математически описывается переход от зоны I к зоне V во времени?

3. Соискатель утверждает, что для образцов в агрессивной среде степенная функция «наименее всего подходит», а полиномиальная – лучше. Однако из текста не ясно, проводилось ли сравнение альтернативных моделей (например, экспоненциальной, логарифмической) или выбор основывался исключительно на визуальном анализе и величине R^2

4. На рисунках с микроструктурой (в частности, рис. 4.9-4.14) плохо видна масштабная метка, позволяющая оценить абсолютные размеры наблюдаемых структур. Автор приводит текстовые описания толщины слоёв (100–200 мкм, 0,1–0,4 мм) и глубины проникновения (2–3 мм), и для того, чтобы верифицировать эти цифры или сравнить морфологию объектов между разными составами, необходимо понимать масштаб изображения.

5. В диссертации детально рассматривается сульфатная и сульфатно-магнезиальная коррозия, однако полностью упущен аспект формирования таумасита, который наиболее активно протекает при пониженных температурах (около +4...+5 °C). В условиях реального функционирования подземных, фундаментных и гидротехнических конструкций именно низкотемпературный режим является критическим для деградации C-S-H фаз с образованием таумасита. Отсутствие

экспериментальных данных или хотя бы теоретического обсуждения этого механизма (с опорой на современные исследования, например, работы, посвященные влиянию твердых растворов эттрингит-таумасит на свойства и коррозионную стойкость) снижает полноту оценки долговечности предлагаемых составов в широком диапазоне эксплуатационных температур.

6. Вызывают серьезные вопросы рассуждения диссертанта на стр. 68–70. Автор справедливо констатирует отсутствие прямой линейной корреляции между прочностью и скоростью УЗ-сигнала (низкий коэффициент R^2), что вполне ожидаемо для гетерогенной системы. Однако далее делается попытка обосновать взаимосвязь через «косвенный фактор (время)», путем построения отдельных линейных трендов для каждой величины и сравнения их коэффициентов детерминации (Таблица 3.2). С точки зрения математической статистики и теории планирования эксперимента, такой подход некорректен: наличие тренда у двух разных величин во времени не доказывает наличие причинно-следственной или функциональной связи между ними (проблема ложной корреляции). Кроме того, аппроксимация заведомо нелинейных, «скачкообразных» кинетических кривых (о чем автор сам пишет ранее) линейными функциями для получения R^2 лишает данный математический аппарат физического смысла и снижает достоверность верификации предлагаемого УЗ-метода.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общую положительную оценку работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертация является самостоятельно выполненной, законченной научно-квалификационной работой, в рамках которой предложено новое научно обоснованное технологическое решение, позволяющее получать бетон с низким расходом вяжущего и повышенной сульфатостойкостью посредством добавления минеральных добавок за счет соразмерного уменьшения концентрации заполнителей.

Диссертация изложена грамотным техническим языком, а её графический материал оформлен на высоком уровне. Сформулированные в работе положения, выводы и рекомендации не противоречат цели и задачам исследования и полностью подтверждаются полученными экспериментальными данными. Диссертация содержит ряд новых научных результатов, обладающих существенной теоретической и практической значимостью для развития строительного материаловедения и строительной отрасли в целом. Автореферат диссертации в полной мере передаёт основное содержание диссертации.

Учитывая актуальность затронутых вопросов, научную новизну, теоретическую и практическую значимость полученных результатов, считаю, что диссертационная работа на тему «Модифицированный бетон повышенной сульфатостойкости» соответствует критериям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 в действующей редакции), предъявляемым к работам, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Данилов Дмитрий Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук

(специальность 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (строительство)»),
доцент кафедры химии и химических технологий ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)»

600000, Россия, Владимирская обл.,
г. Владимир, ул. Горького, 87
Тел. +7 (4922) 47-97-41
E-mail: irinanebukina@rambler.ru

Красильникова

Ирина Александровна

« 16 » 09 2026 г.

Личную подпись И.А. Красильниковой удостоверяю

