

На правах рукописи



АЛИМОВ МАРАТ ФАТИХОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ
И КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ В ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТАХ,
РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИИ ДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Пенза – 2022

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

Научный руководитель – академик РААСН,
доктор технических наук, профессор
Селяев Владимир Павлович

Официальные оппоненты – **Римшин Владимир Иванович**
член-корреспондент РААСН, доктор
технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет», профессор кафедры
«Жилищно-коммунального комплекса»
(г. Москва)

– **Болдырева Ольга Вячеславовна**
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО
«Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства», доцент
кафедры «Строительные конструкции»
(г. Пенза)

Ведущая организация – **ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»**
(г. Казань)

Защита состоится 7 апреля 2022 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.356.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, корп.1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/24-2-356-01/116-0612-alimov-marat-fatihovich>.

Автореферат разослан 7 февраля 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Снежкина
Ольга Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

Железобетон – многофункциональный строительный материал, который находит широкое применение в промышленном, гражданском, жилищном строительстве, при возведении специальных сооружений. Однако он имеет ряд недостатков, среди которых наиболее опасным является плохая сопротивляемость действию химических агрессивных сред. Коррозионное повреждение стальной арматуры может привести к внезапному разрушению ответственных конструкций и сооружений. Поэтому задача повышения химического сопротивления железобетонных конструкций действию агрессивных сред является актуальной, востребованной практикой, направленной на обеспечение надежности, жизнеспособности зданий и сооружений.

В коррозионном разрушении железобетона слабым местом является стальная арматура, коррозия которой может протекать латентно и усиливаться под действием электрических полей, при образовании трещин, изменении рН поровой жидкости бетона. Замена стальной арматуры на композитную не только обеспечивает коррозионную стойкость армобетона, но и дает возможность создавать новые виды армобетонных конструкций: радиопрозрачные, электронезависимые, химически стойкие.

Многочисленные экспериментальные данные по композитной арматуре в научной литературе подтверждают ее перспективность и необходимость проведения дальнейших интенсивных исследований с целью расширения возможностей ее применения в армобетонных конструкциях.

В настоящее время в России активно наращиваются объемы производства композитной арматуры. Для ее эффективного использования в армобетонных конструкциях необходимо:

- экспериментально исследовать ее физико-механические свойства при действии повышенных температур и щелочной среды;
- провести исследования изгибаемых элементов при совместной работе цементного бетона и композитной арматуры в условиях действия агрессивных сред и силового нагружения для изучения характерных особенностей деформирования и разрушения;
- уточнить оптимальные области применения композитной арматуры с учетом свойств, обеспеченных современным уровнем технологии ее производства.

Работа выполнялась в рамках фундаментальных научных исследований:

- по гранту РФФИ № 53/84-13 «Исследование в области создания функционально градиентных покрытий строительных изделий и прогнозирование их долговечности в различных климатических зонах на основе полиструктурных, топологических и перколяционных моделей»;

– по Плану ФНИ Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) и Минстроя России ФНИ 7.1.10/2013 «Изучение особенностей механики разрушения волокнистых композитов, а также изделий и конструкций из бетона, армированного стекло-, базальто- и углепластиковыми стержнями и пластинами».

Степень разработанности темы исследования

Вопросами возможности применения и исследования работы композитной арматуры в бетонных конструкциях занимались как отечественные, так и зарубежные ученые. Значимый вклад внесли А. А. Гвоздев, Н. П. Фролов, Ю. М. Вильдавский, К. В. Михайлов, И. С. Дуров, Н. А. Мощанский, В. И. Соломатов, В. П. Селяев, Р. Г. Литвинов, А. П. Васильев, В. И. Морозов, В. Ф. Степанова, В. И. Римшин, В. Г. Хозин, И. И. Фридман, Б. Брик, В. Франк, С. Кайфаш, В. Вайс. Основное внимание было уделено изучению физико-механических свойств композитов, способов усиления железобетонных конструкций внешними армирующими композитными покрытиями. Однако следует отметить, что проведенные экспериментальные исследования работы армобетонных конструкций, изготовленных с применением композитной арматуры, иногда противоречивы, характер разрушения опытных образцов не всегда соответствует предполагаемой расчетной модели. Нет данных о совместной работе композитной арматуры и цементного бетона в условиях действия агрессивных сред. Многие авторы, используя однотипные материалы, получили результаты, которые не поддаются сопоставлению. Поэтому исследования совместной работы цементного бетона и композитной арматуры с учетом условий эксплуатации являются актуальными.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационного исследования является экспериментально-теоретическое изучение закономерностей деформирования и разрушения изгибаемых элементов из цементного бетона, армированных композитной арматурой, работающих в условиях действия агрессивных сред.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- исследовать особенности разрушения композитной стеклопластиковой арматуры при продольном изгибе с целью обоснования и верификации методов определения нормативного сопротивления при сжатии и растяжении, а также модуля упругости;
- разработать модели зависимости прочности и деформативности композитной арматуры от температуры и агрессивного воздействия водных растворов с повышенным рН (водородным показателем);
- экспериментально изучить закономерности совместной работы композитной арматуры и цементных бетонов в изгибаемых элементах при действии статических нагрузок и агрессивных сред, содержащих ионы хлора;

– разработать модели деградации изгибаемых элементов из цементного бетона, армированных композитной стеклопластиковой арматурой, позволяющие прогнозировать изменения несущей способности, а также образование дополнительных прогибов под действием агрессивных сред;

– исследовать экспериментальные и аналитические диаграммы деформирования цементных бетонов при сжатии для выполнения численного моделирования работы армобетонных изгибаемых элементов с учетом физической нелинейности работы материала;

– разработать рекомендации по применению композитной арматуры в изгибаемых армобетонных конструкциях на основе цементного бетона.

Научная новизна исследования

Предложены простые способы определения прочности при сжатии и растяжении, и модуля упругости композитной арматуры, основанные на применении метода продольного изгиба. Установлено, что предложенный метод обеспечивает хорошую воспроизводимость данных и объективно оценивает прочностные характеристики композита.

Получены данные кинетики физико-механических характеристик композитных стеклопластиковых стержней, установлена зависимость прочности и жесткости композитной арматуры от температуры и длительности действия щелочной среды.

На основе теоретических и экспериментальных исследований получены новые результаты по прочности, жесткости, трещиностойкости и ширине раскрытия трещин нормальных и наклонных сечений изгибаемых балок, армированных композитной стеклопластиковой и стальной арматурой, в условиях силового нагружения и действия агрессивных сред. Установлено, что характер процессов деформирования и разрушения элементов с композитной стеклопластиковой арматурой соответствует развитию аналогичных процессов при нагружении балок со стальной арматурой. Балки с композитной стеклопластиковой арматурой, работающие на изгиб, имеют повышенную деформативность. Выявлены два основных вида разрушения изгибаемых балок с композитной арматурой: по нормальным сечениям в результате разрыва рабочей растянутой арматуры; по наклонным сечениям с раздроблением бетона сжатой зоны. В результате воздействия водного раствора NaCl происходит снижение прочности бетона и жесткости изгибаемого элемента. При этом свойства композитной арматуры под действием агрессивной среды не изменяются.

Получены данные о характере развития трещин при разных значениях коэффициента армирования μ (0,12 и 0,49) армобетонных изгибаемых элементов с композитной стеклопластиковой арматурой. При нагружении образцов кратковременной нагрузкой в изгибаемых элементах первыми образуются трещины в зоне максимальных моментов. С ростом нагрузки при низких коэффициентах армирования (0,12) разрушение происходит по сечениям, нормальным к продольной оси, при увеличении процента

армирования до уровня 0,49 разрушение балок происходит по наклонным трещинам в приопорной зоне.

Получены экспериментальные диаграммы деформирования цементных бетонов при сжатии со скоростью нагружения $\dot{\theta} = 0,5$ мм/мин и частоте записи данных $\sigma, \varepsilon 0,1$ с, которые позволяют констатировать, что деградация структуры бетона начинается с момента приложения нагрузки и усиливается при действии агрессивных сред. Это дает возможность обосновать статистическую природу разрушения и представить его в виде дискретно-непрерывного процесса.

Установлено, что аналитическую зависимость напряжений от деформаций цементных бетонов при сжатии можно представить полиномиальной функцией третьего порядка, используя для определения аппроксимирующих коэффициентов метод нормируемых показателей, что дает возможность по данным изменения значений свойств бетона (E_b, R_b) получать зависимость $\sigma - \varepsilon$ для любого момента времени в заданном сечении изделия.

Установлено, что модели деградации адекватно отражают особенности совместной работы цементных бетонов и композитной арматуры в условиях действия агрессивных сред и дают возможность оценивать остаточный ресурс изгибаемых элементов по прочности нормальных и наклонных сечений.

Определены основные показатели химического сопротивления цементного бетона: глубинный показатель a ; предельная сорбционная емкость ω_m ; коэффициент химического сопротивления $k_{х.с.}$; характеристика полураспада $t_{0,5}$; коэффициент диффузии D .

Теоретическая и практическая значимость работы

Разработаны модели расчета прочности нормальных и наклонных сечений, деформативности армобетонных изгибаемых элементов, работающих в условиях действия агрессивных сред.

Предложены рекомендации по улучшению состава матрицы композитной арматуры для увеличения ее термостойкости.

Экспериментально обоснована и подтверждена возможность применения метода продольного изгиба при определении нормативных значений прочности и модуля упругости композитной стеклопластиковой арматуры.

Методология и методы диссертационного исследования

Методология диссертационного исследования основана на результатах научных изысканий отечественных и зарубежных ученых, и включает математические методы планирования эксперимента при изучении конструктивных свойств материалов и их системный статистический анализ.

Оценка прочности, жесткости и трещиностойкости экспериментальных балок выполнялась по ГОСТ 8829–2018 методом четырехточечного изгиба. Контроль величины нагрузки осуществлялся при помощи переносного динамометра ДОСМ-3-50У 5098. Прогиб

измерялся прогибомерами часового типа с ценой деления 0,1 мм. Ширина раскрытия трещин измерялась оптическим микроскопом МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм. Воздействие агрессивной среды осуществлялось путем выдержки образцов в 25%-м водном растворе NaCl. Численное моделирование экспериментальной балки при действии кратковременной статической нагрузки выполнялось в программном комплексе Midas FEA NX 2021. Исследование физико-механических свойств стеклопластиковой арматуры при повышенных температурах и pH среды проводилось методом продольного изгиба согласно ГОСТ 32492–2013 с использованием климатической камеры испытательного комплекса Wille geotechnik 13 DP/401.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования физико-механических свойств композитной арматуры, определенные методом продольного изгиба при действии повышенных температур и агрессивного воздействия водных растворов с повышенным pH;
- результаты оптимизации состава эпоксидной матрицы композитной арматуры с целью повышения предельной температуры эксплуатации;
- результаты экспериментального определения прочностных и сорбционных характеристик композитной стеклопластиковой арматуры при воздействии агрессивной щелочной среды;
- результаты анализа экспериментальных диаграмм деформирования цементного бетона при сжатии, полученных в условиях скоростной записи значений усилий и деформаций;
- результаты экспериментальных исследований прочности, жесткости и трещиностойкости при совместной работе цементных бетонов и композитной арматуры в изгибаемых элементах при действии статических нагрузок и агрессивных сред, содержащих ионы хлора;
- модель деградации изгибаемых элементов, сформированная на основе метода предельных состояний и фундаментальных законов физики и химии, позволяющая оценивать остаточный ресурс изгибаемых элементов по прочности нормальных и наклонных сечений под действием агрессивных сред.

Степень достоверности основных результатов диссертационной работы обеспечивается проведением исследований в соответствии с действующими нормативно-техническими документами РФ; использованием сертифицированных поверенных установок и измерительных приборов; применением методов математического планирования экспериментов и статистического анализа полученных данных.

Внедрение результатов исследования

По результатам диссертационного исследования предприятием ООО «Волговястстрой» была выпущена пробная партия перемычек серии 1.038.-1 с расчетной нагрузкой не более 7,85 кН/м, которые были смонтированы

при строительстве многоэтажного жилого дома, расположенного по ул. Серадзская г. Саранска.

Теоретические выводы диссертационной работы рекомендованы и включены в рабочие программы магистратуры по направлению подготовки 08.04.01, профиль «Фундаментальные основы прогнозирования и повышения надежности, долговечности строительных материалов, конструкций зданий и сооружений».

Объектом исследования являются армобетонные балки прямоугольного сечения 140×120×1030 мм из бетона класса В20, армированные стеклопластиковыми арматурными стержнями, и аналогичные балки, армированные металлической арматурой, а также стеклопластиковая арматура компаний «АРМАСТЕК» (г. Пермь) и ООО «Комбинат композитных материалов» (г. Саранск).

Апробация работы

Положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждались на семинарах кафедры строительных конструкций НИ МГУ им. Н. П. Огарёва; на XX научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва (г. Саранск, 2016 г.); на IV Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов ТЕСТМАТ-2014 (г. Геленджик); на Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (г. Саранск, 2014 г.); на Всероссийской научно-технической конференции «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций» (г. Саранск, 2014, 2018 г.).

Публикации

Основные результаты и выводы диссертационной работы изложены в 21 научной публикации, в том числе в девяти работах в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Получен патент РФ (№ RU 150463) на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 217 страницах, состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы, включающего 143 наименования, пяти приложений (на 50 страницах), содержит 70 рисунков и 25 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, сформулирована цель и поставлены основные задачи для ее достижения. Охарактеризованы научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены виды композитной арматуры, способы ее изготовления, физико-механические характеристики арматурных стержней, их основные достоинства и недостатки. Установлено, что композитная арматура имеет удельный вес в пять раз меньше, чем у металлической арматуры, высокий предел прочности при растяжении, обладает низкой теплопроводностью, радиопрозрачна, магнитоустойчива, электронезависима. К недостаткам отнесены: низкий модуль упругости, низкая температурная устойчивость, снижение прочности при длительном воздействии щелочной среды. Отмечено, что диаметр арматурных стержней влияет на прочностные показатели: с его увеличением прочность снижается. Это явление объясняется масштабным эффектом.

Рекомендованный ГОСТом метод контрольных испытаний на осевое растяжение сложен, трудоемок и при испытании не дает объективной оценки прочности материала, так как происходит либо выskalзывание образца из муфты, либо его разрыв вне рабочего участка, что объясняется концентрацией напряжений в зоне обжатия анкерных муфт коническими захватами испытательных машин. Большинство разрывных машин имеет длину испытательной базы намного меньше длины экспериментального образца. Высокая статистическая неоднородность экспериментальных значений прочности при растяжении обусловлена несовершенством методов испытаний.

Представлен аналитический обзор исследований совместной работы цементных бетонов и композитной арматуры. Проведенные эксперименты по изучению прочности армобетонных конструкций, изготовленных с применением композитной арматуры, показали различный характер разрушения опытных образцов. Многие авторы, используя однотипные материалы, получили результаты, которые не поддаются сопоставлению. Проанализирован опыт усиления бетонных и железобетонных конструкций эпоксидными полимерными армирующими покрытиями.

Рассмотрены методы расчета и оценки долговечности железобетонных конструкций, работающих в условиях действия агрессивных сред, среди которых выделены три основных – вероятностный, материаловедческий и конструкторский. Сформулированы принципы расчета и прогнозирования долговечности армобетонных конструкций.

Вторая глава посвящена исследованиям прочностных и деформативных характеристик композитной стеклопластиковой арматуры. Приведены результаты испытаний по определению предела прочности при растяжении.

В связи с несовершенством нормативного метода предложено предел прочности при растяжении и модуль упругости композитной арматуры определять методом продольного изгиба.

Образец в виде гибкого шарнирно опертого стержня нагружается осевой сжимающей силой до разрушения. В процессе нагружения фиксируются значения сжимающей силы (F) и осевые перемещения торцов стержня (Δ); строится диаграмма деформирования « $F-\Delta$ ». По результатам обработки экспериментальных данных строится диаграмма деформирования « $\sigma - \varepsilon$ », определяются модуль упругости (E_i) и предел прочности (R_i).

Из анализа экспериментальных данных следует, что при определении модуля упругости методом продольного изгиба получены достоверные результаты. Точность определения E была оценена путем установления критической силы по формуле Эйлера

$$E = F_3 L^2 / (\pi^2 J). \quad (1)$$

Прочностные показатели σ , полученные методом продольного изгиба, свидетельствуют о высокой однородности результатов (рисунок 1), следовательно, данный метод можно рекомендовать для оценки прочности композитной арматуры.

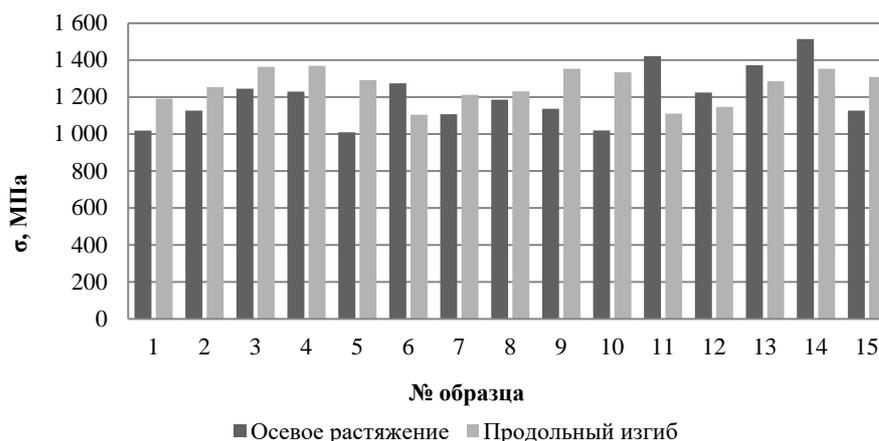


Рисунок 1 – Прочностные показатели σ при испытании методом продольного изгиба и при осевом растяжении

В результате испытаний стеклопластиковых арматурных стержней методом продольного изгиба при действии повышенных температур и рН щелочной среды установлено снижение прочности при воздействии щелочной агрессивной среды на 10 – 15 %; при температуре более 60 °С арматурный стержень становится более пластичным, модуль упругости и прочность арматуры заметно уменьшаются.

Для повышения температуры эксплуатации и щелочестойкости предложено в состав эпоксидной матрицы композитной арматуры вводить дисперсный оксид алюминия (Al_2O_3) и отвердитель ПЭПА (полиэтиленполиамин). Наиболее термостойким оказался состав № 1 с содержанием 20 % отвердителя ПЭПА и 30 % оксида алюминия на 100 % массы эпоксидной смолы ЭД-20. Разработанный состав матрицы был

применен для изготовления стеклопластиковой арматуры, образцы которой были испытаны при различных температурах методом продольного изгиба (рисунок 2).

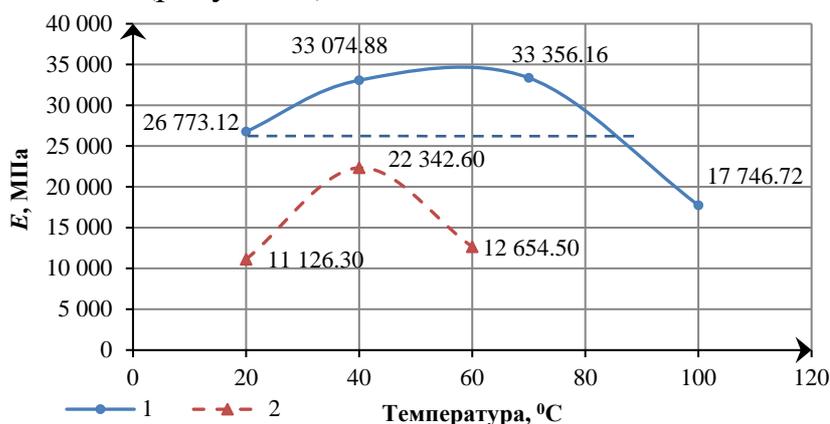


Рисунок 2 – График зависимости модуля упругости от температуры эксплуатации: 1 – экспериментальный состав матрицы; 2 – состав завода-изготовителя

В результате экспонирования композитной арматуры, изготовленной с применением экспериментального состава матрицы в водном растворе NaOH с pH12, установлено, что процесс переноса щелочной среды в эпоксидный композит самотормозящийся; коэффициент диффузии $D_m = 0,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{ч}$ (рисунок 3).

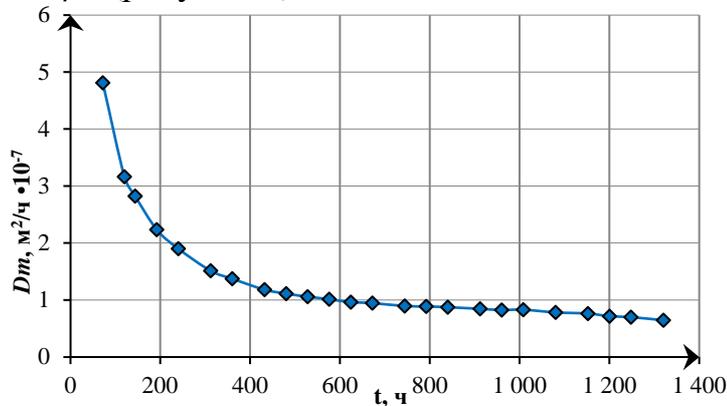


Рисунок 3 – График изменения коэффициента диффузии

В третьей главе представлены результаты испытаний бетонных изгибаемых элементов, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой. Были изготовлены четыре серии балок размером 140(h)×120(b)×1030(l) мм, армированных стеклопластиковой и стальной арматурой диаметром 6 мм.

Перед испытанием была определена прочность бетона балок неразрушающими методами; построены изолинии прочности бетона на боковой поверхности. В результате анализа установлено: прочность бетона весьма неравномерно распределена в пределах площади боковой поверхности; вдоль неармированной грани балки прочность распределена более равномерно (18 – 28 МПа); вдоль армированной грани диапазон

изменения прочности находится в пределах (12 – 40 МПа); армирование вызывает развитие дезинтеграции структуры бетона, формирование ослабленных областей. Распределение прочности или модуля упругости по длине армированной грани балки можно описать синусоидой вида

$$\sigma = \sigma_m + \Delta\sigma \sin \frac{\pi x}{L_{crc}}, \quad (2)$$

где L_{crc} – расстояние между трещинами, которые делят балку на условные блоки.

Расстояние между трещинами предложено определять с помощью формулы

$$L_{crc} = \frac{d}{8\mu}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент армирования.

По результатам испытаний балок построены графики зависимости между изгибающими моментами, деформациями и шириной раскрытия трещин. Результаты испытаний представлены на рисунках 4 – 7.

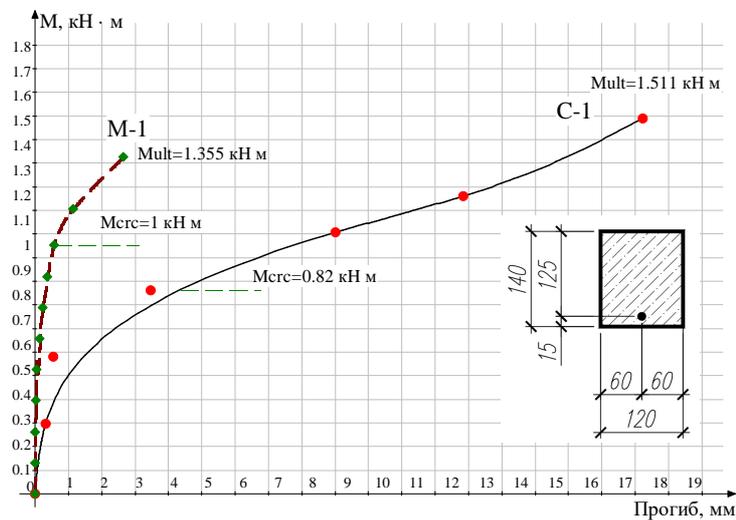


Рисунок 4 – Зависимость величины прогибов от роста нагрузки балок С-1 и М-1

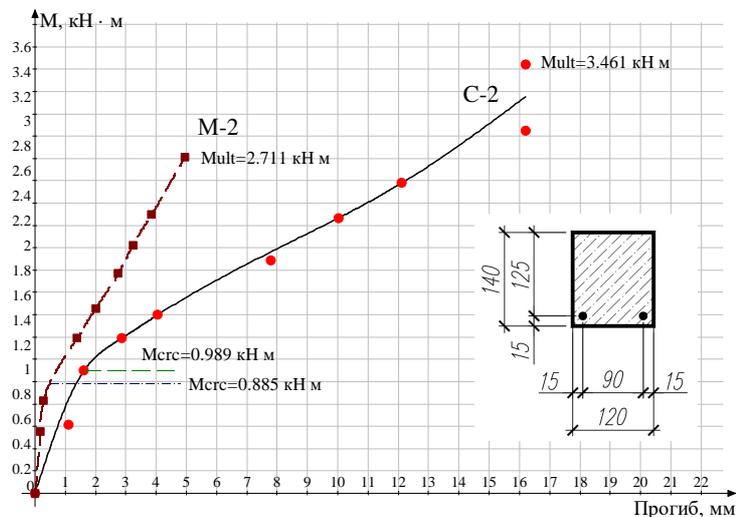


Рисунок 5 – Зависимость величины прогибов от роста нагрузки балок С-2 и М-2

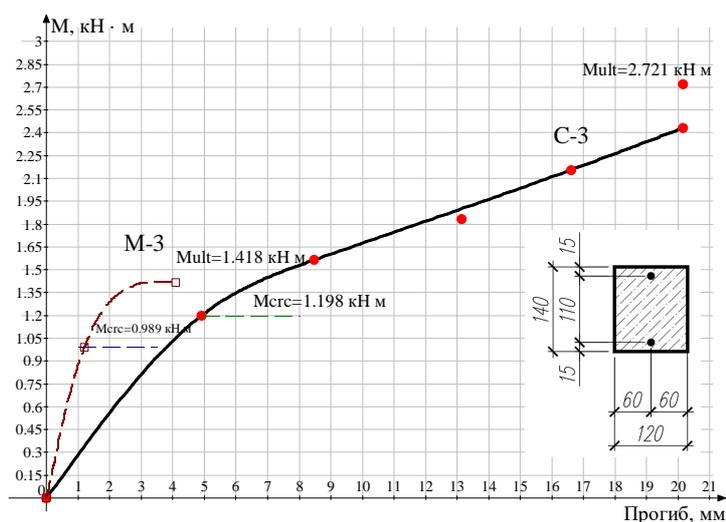


Рисунок 6 – Зависимость величины прогибов от роста нагрузки балок С-3 и М-3

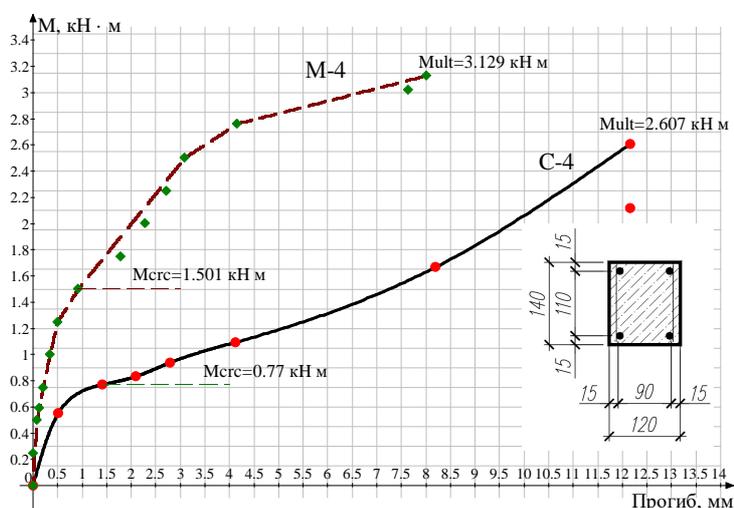


Рисунок 7 – Зависимость величины прогибов от роста нагрузки балок С-4 и М-4

На рисунках 4 – 7 принят следующий принцип обозначений: «С- ...» – балки, армированные композитной стеклопластиковой арматурой; «М-...» – металлической.

Анализируя схемы образования трещин, можно сделать вывод, что при нагружении образцов кратковременной нагрузкой для балок всех типов серий первыми образуются нормальные трещины в зоне максимальных моментов. С ростом нагрузки в зависимости от процента армирования появляются трещины в приопорной зоне, а также наклонные трещины.

В изгибаемых армобетонных балках с композитной арматурой прослеживаются два главных вида разрушения: по нормальным сечениям в результате разрыва рабочей растянутой арматуры; по наклонным сечениям с раздроблением бетона сжатой зоны.

Разрушение по нормальным сечениям происходит в результате разрыва арматуры при низких коэффициентах армирования – $\mu = 0,12$ %. С увеличением μ до 0,49 % разрушение происходит по наклонной трещине. Таким образом, в балках с минимальным процентом армирования (С-1, С-3) разрушение произошло в результате развития нормальной трещины. Балки серий (С-2, С-4) разрушились в результате образования и развития наклонных трещин.

Согласно СП 295.1325800.2017 определены расчетные значения сопротивления при растяжении арматуры – $R_f = 513,51$ Н/мм². Экспериментально установлено, что для балок С-1, С-3 в момент разрушения напряжение в арматуре $\sigma_f^p = 542,63$ Н/мм², что на 5,67 % больше расчетного значения по СП и на 43,64 % меньше нормативного. Для балок серий С-2 С-4 $\sigma_f^p = 608,180$ Н/мм², что на 18,44 % больше расчетного сопротивления по СП и на 36,83 % меньше нормативного.

Проведены испытания балок серий С-1 и С-3 при экспонировании в 25%-м водном растворе NaCl в течение 60 суток. Периодически производились испытания данных балок на изгиб с фиксацией прогибов и ширины раскрытия трещин: первое испытание – до выдержки в агрессивной среде; второе испытание – после выдержки в течение 10 суток; третье испытание – после выдержки в течение 20 суток; четвертое испытание – после выдержки в течение 30 суток; пятое испытание – после выдержки в течение 40 суток. При каждом испытании значения предыдущих нагрузок сохранялись. Установлено, что под действием 25%-го раствора NaCl жесткость и трещиностойкость балок значительно снижаются. Изменяется характер разрушения балок по сравнению с балками, не подвергавшимися воздействию агрессивной среды. Балки, выдержанные в водном растворе NaCl, разрушались по бетону в сжатой зоне, а разрушение балок, не подвергшихся воздействию агрессивной среды, происходило в результате разрыва арматуры. Очевидно, что такой характер разрушения балок вызван снижением прочности бетонного камня.

Анализ результатов экспериментальных исследований свидетельствует, что замена стальной арматуры на композитную приводит к снижению жесткости, трещиностойкости изгибаемых элементов; возрастает проявление физической нелинейности в работе материала конструкций; происходит изменение механизма разрушения элемента, что особенно заметно при совместном действии силовой и химической нагрузок. Поэтому при разработке методов расчета и прогнозирования необходимо особое внимание уделить проявлению и описанию физической нелинейности в работе бетона и арматуры под действием нагрузки и агрессивных сред, а также расчету изгибаемых элементов по второй группе предельных состояний.

В четвертой главе представлены результаты моделирования работы армобетонного изгибаемого элемента с учетом нелинейной

функциональной зависимости « $\sigma - \epsilon$ ». Для выполнения численного моделирования были исследованы диаграммы деформирования бетона при сжатии. Получены экспериментальные диаграммы деформирования бетона в условиях скоростной записи значений усилий и деформаций, из анализа которых видно, что процесс разрушения является дискретным, описывается фрактальной линией, которая представлена микромасштабными самоподобными дискретными диаграммами, которые, вероятно, соответствуют разрушению структурных элементов. Установлено, что интенсивность процесса разрушения неоднородна; она возрастает по мере увеличения нагрузки, достаточно стабильна на третьем и четвертом этапах (рисунок 8).

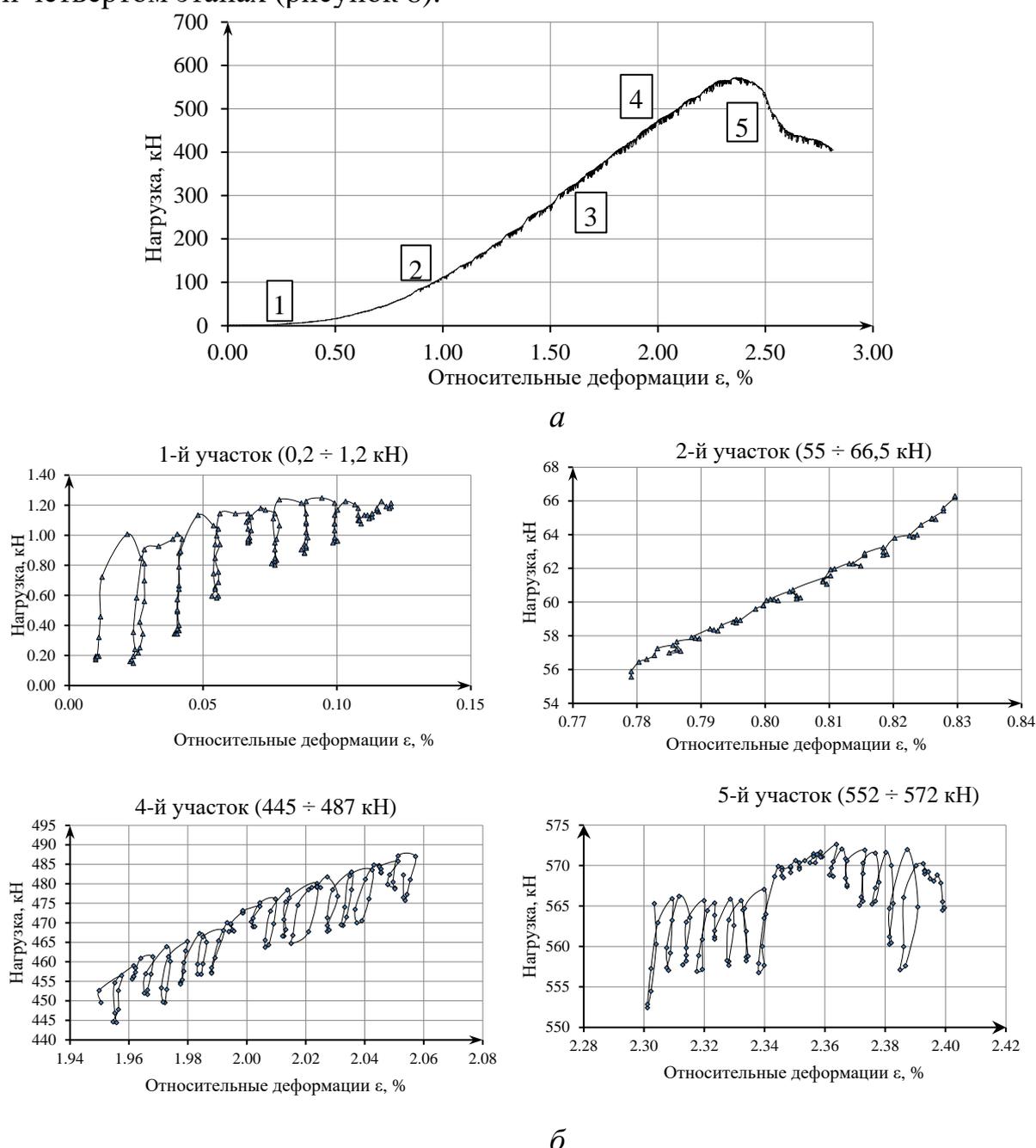
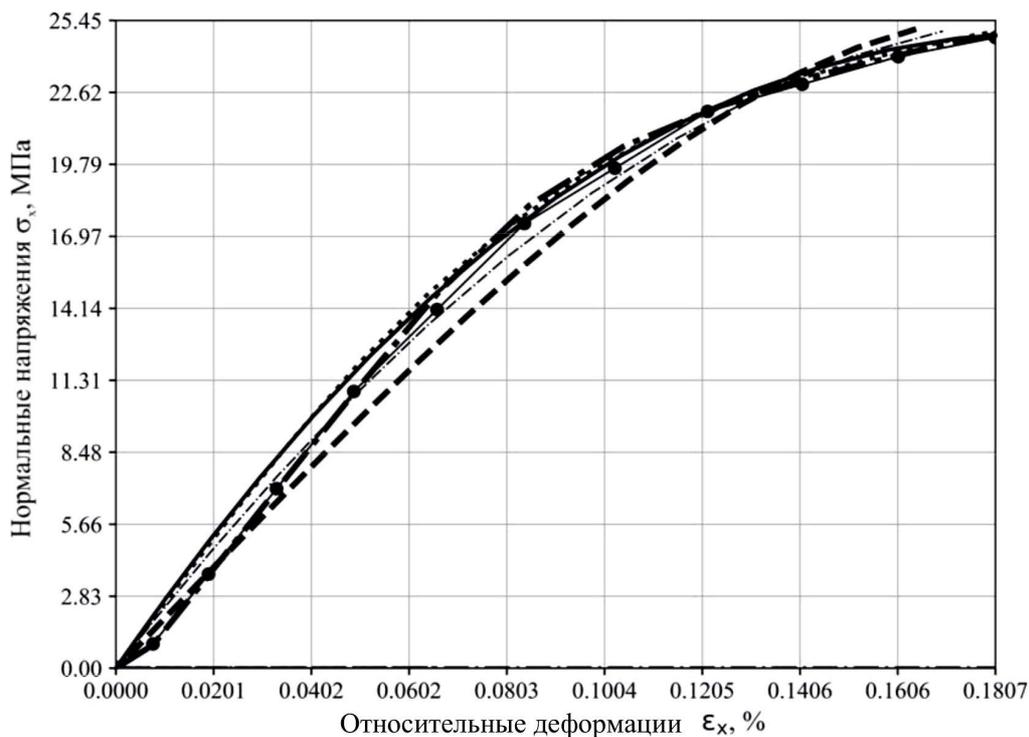


Рисунок 8 – Диаграммы интенсивности отказов при сжатии бетона класса В20-30 (скорость 0,5 мм/мин, частота сбора данных 0,1 с): *а* – общий вид; *б* – вид участков 1, 2, 4, 5

Рассмотрены используемые в настоящее время линейные, степенные, полиномиальные, экспоненциальные, тригонометрические и логарифмические аналитические функции для описания диаграмм деформирования бетона. Показано, что метод нормируемых показателей дает возможность описать связь между напряжениями и деформациями в любой точке изделия; современные методы аппроксимации обеспечивают высокую степень приближения к экспериментальным данным (рисунок 9).



● — экспериментальная зависимость; ----- — степенная зависимость Г. Б. Бюльфингера; - - - - - — параболическая зависимость Ф. И. Герстнера; - - - — степенная зависимость А. Р. Ржаницына; — — — — — зависимость Сен-Венана; - - - - - — экспоненциальная зависимость первого типа; - · - · - — экспоненциальная зависимость второго типа; ···· — гиперболическая зависимость С. П. Тимошенко; — · — — — — зависимость П. И. Васильева, С. Е. Фрайфельда и В. М. Бондаренко

Рисунок 9 – Расчетные кривые зависимости напряжений от деформаций

Для оценки влияния вида функции « $\sigma - \varepsilon$ » на расчетные прогибы изгибаемого элемента произведен расчет пластины из изотропного материала методом последовательного нагружения.

Если проанализировать расчетные графики зависимости прогибов от нагрузки (рисунок 10), то видны большие расхождения значений прогибов степенной функции Г. Б. Бюльфингера и экспоненциальной функции первого типа. Функции С. П. Тимошенко и Сен-Венана дают заниженные значения прогибов. Достаточно близкие их значения дают зависимости Ф. И. Герстнера и А. Р. Ржаницына.

1 198,75 Н/мм², на 35,63 % меньше нормативного $R_{f,n} = 962,836$ Н/мм² и на 20,7 % больше расчетного значения $R_f = 513,51$ Н/мм².

5. Полученные результаты численного моделирования по значениям напряженно-деформированного состояния близки к значениям, полученным экспериментально, что позволяет рекомендовать ПК Midas FEA NX 2021 для детального анализа работы цементного бетона с композитной арматурой.

В пятой главе выполнены оценка остаточного ресурса армобетонных изгибаемых элементов, подверженных действию хлоридной коррозии, по прочности нормального и наклонного сечения, а также вероятностная оценка надежности прогнозирования долговечности армобетонных конструкций методом деградационных функций.

На основе метода предельных состояний и кинетических законов взаимодействия масс сформулирована расчетная модель, позволяющая прогнозировать проектный и остаточный ресурс изгибаемых элементов.

Модель деградации представлена в виде изолиний (рисунок 11), характеризующих распределение свойств по высоте поперечного сечения изгибаемого элемента. Основные параметры деградации: a – координата фронта деградации, или глубинный показатель, характеризующий влияние процесса переноса субстанции на работу элемента; $k_{х.с.}$ – коэффициент химического сопротивления, определяемый по изменению свойств бетона в контактной зоне.

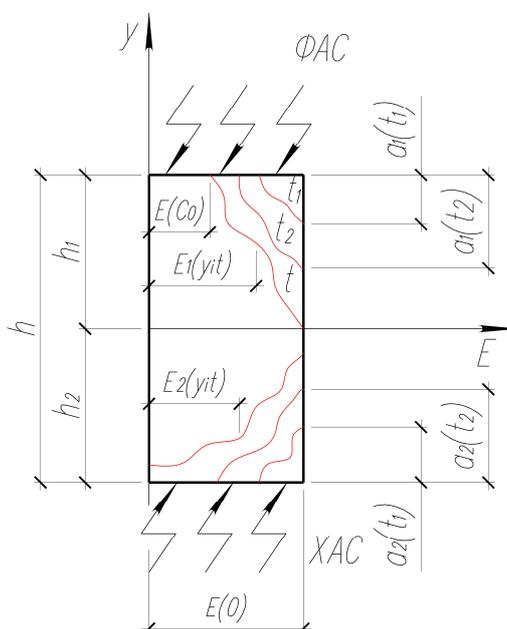


Рисунок 11 – Феноменологическая модель деградации поперечного сечения изгибаемого конструкционного элемента

Координату фронта деградации a предложено определять на основе закона сохранения массы с учетом уравнений Фика и Лангмюра по формуле

$$a = k(\omega)R \sqrt{\frac{t}{t_{0,5}}}, \quad (4)$$

где R – характерный (приведенный) размер образца;

$t_{0,5}$ – кинетическая константа, соответствующая $\omega = 0,5 \cdot \omega_{max}$;

ω_{max} – предельная сорбционная емкость.

Коэффициент химического сопротивления $k_{x.c.}$ предложено определять на основе анализа бимолекулярной модели закона действия масс (Закон Гульдберга – Вааге):

$$k_{x.c.} = \frac{1}{k_0 t + 1}. \quad (5)$$

Основные параметры модели деградации определены экспериментально. Показатели химического сопротивления приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели химического сопротивления цементного вяжущего экспериментальной балки

№ п/п	Среда	Предельная сорбционная емкость $\omega_m, \%$	$t_{0,5}, \text{ ч}$ (20×20×70 мм)	$k_{x.c.}$ (180 суток)	$D \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{ч}$
1	25% NaCl	2,84	444	0,90	1,80

Под действием агрессивной среды происходит снижение прочности бетона внешних контактных слоев балки на величину $k_{x.c.}$ и на глубину a . Экспериментально установлено, что после 60 суток действия ионов хлора несущая способность балок M_u снизилась на 7 %, момент образования трещин – на 14 %; прогибы f_{ser} увеличились в 1,5 раза.

С учетом деградационных функций изменение несущей способности (M_u), момента трещинообразования (M_{crc}) и прогибов (f) от длительности (t) действия агрессивной среды предложено определять по формулам

$$M_u(t) = \alpha_m R_b b h_0^2 \left[1 - \frac{(1-k_{x.c.})a/h}{1-0,5\mu R_s/R_b} \right]; \quad (6)$$

$$M_{crc}(t) = M_{crc}(0) \left[k_{x.c.} + \left(1 - 2\frac{a}{b} \right) \left(1 - 2\frac{a}{h} \right)^2 (1 - k_{x.c.}) \right]; \quad (7)$$

$$f = \frac{f(0)}{k_{x.c.} + \left[\left(1 - 2\frac{a}{b} \right) \left(1 - 2\frac{a}{h} \right)^3 (1 - k_{x.c.}) \right]}. \quad (8)$$

Расчетом деградационных функций $M_u(t)/M_u(0)$, $M_{crc}(t)/M_{crc}(0)$ и $f_{ser}(t)/f_{ser}(0)$ установлено, что через 60 суток действия агрессивных сред происходит снижение M_u и M_{crc} соответственно на 2 и 13 %; повышение прогибов f_{ser} на 16 %.

Расчетные значения функций деградации, соответствующие заданным значениям a/h , приведены в таблице 2 и на рисунке 12.

Таблица 2 – Расчетные значения функций деградации, соответствующие значениям a/h и $k_{x.c.}$, определенным экспериментально

№ п/п	a/h	$t = \frac{a^2}{0,16D}, \text{ ч}$ { $D = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{ч}$ }	$k_{x.c.} = \frac{1}{2,57 \cdot 10^{-5} t + 1}$	Деградационные функции			
				M_u	M_{crc}	W_u	Q_u
1	0,1	$0,06 \cdot 10^5$	0,85	0,98	0,89	0,86	0,93
2	0,2	$0,27 \cdot 10^5$	0,59	0,88	0,55	0,5	0,67
3	0,3	$0,61 \cdot 10^5$	0,39	0,77	0,30	0,278	0,43
4	0,4	$1,08 \cdot 10^5$	0,26	0,65	0,176	0,171	0,21
5	0,5	$1,7 \cdot 10^5$	0,19	0,54	0,11	0,110	0,04

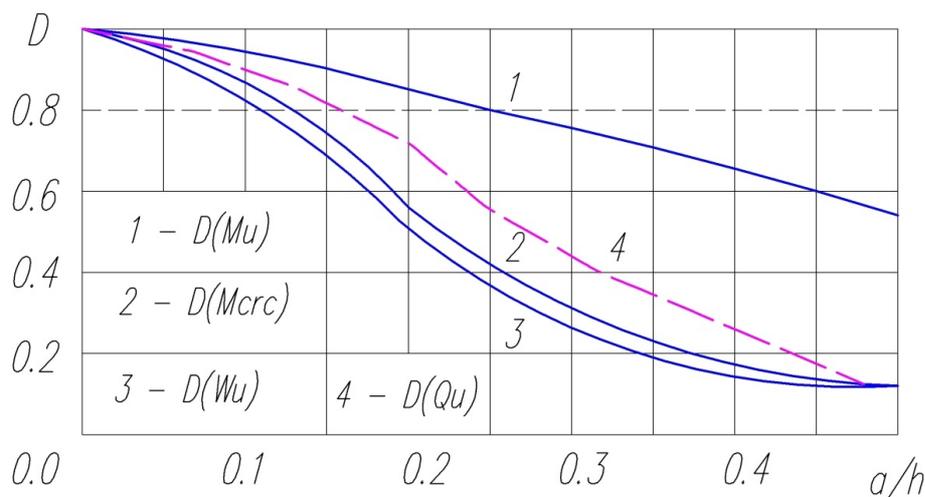


Рисунок 12 – Деградационные функции

По графикам деградационных функций (рисунок 12) выполнена оценка ресурса конструкции. Если принять, что ремонтные работы необходимо производить после того как несущая способность изгибаемого элемента снизится на 20 %, то $D(M_u) = 0,8$. По графику функции $D(M_u)$ находим, что разрушение структуры произойдет на глубину $a/h=0,25$ через $t = \frac{a^2}{0,16D} = \frac{0,035^2}{0,16 \cdot 1,8 \cdot 10^{-7}} = 42\,534,72 \text{ ч} = 1\,772,28 \text{ сут} = 4,85 \text{ года}$ (25 % NaCl). Следовательно, через 4,85 года эксплуатации в заданных условиях железобетонный элемент необходимо диагностировать и предложить варианты восстановительного ремонта.

Рассмотрена расчетная модель прочности наклонного сечения изгибаемого элемента (рисунок 13), работающего в условиях действия агрессивных сред. Предполагая, что разрушение бетона произойдет по условию прочности Кулона – Навье $|\tau| + \gamma\sigma \leq R_{b\tau}$, с учетом действия агрессивной среды получена функция (9):

$$Q_{b4}(t) = \varphi \frac{R_{b\tau} b h}{1 + \gamma c / h} \left[1 - \frac{A_1}{b h} (1 - k_{x.c.}) \right], \quad (9)$$

где $\varphi = \left(1 + \frac{c^2}{h^2} \right)$;

$$A_1 = b(a_1 + a_2) + 2a_3[h - (a_1 + a_2)].$$

Коэффициент $\varphi = 2$, если трещина развивается под углом 45° .

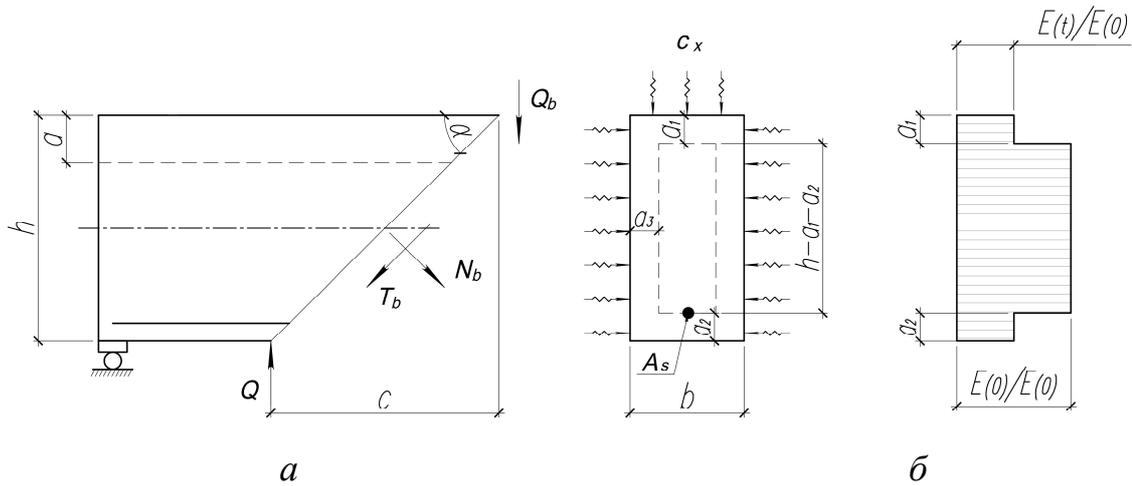


Рисунок 13 – Расчетная модель прочности наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов, подверженных действию агрессивных сред: *а* – силовая модель; *б* – модель деградации

Анализ предложенных функций Q_{bi} (при $t = 0$, $A_1 = 0$) показал, что изменение поперечной силы, воспринимаемое поперечным сечением, зависит от соотношения c/h и коэффициента трения γ .

Исследование показало, что под действием хлоридной коррозии происходит снижение прочности наклонного сечения.

По графику деградационной функции (см. рисунок 12) определен ресурс конструкции. При $D(Q_u) = 0,8$ находим, что предельное состояние по прочности наклонного сечения наступит при глубине коррозионного повреждения $\frac{a}{h} = 0,17$ (через 2,25 года).

С учетом статистической изменчивости геометрических характеристик, свойств материала, силовых нагрузок, степени воздействия агрессивной среды выполнена вероятностная оценка изменения надежности изгибаемого элемента, армированного одиночным стержнем композитной стеклопластиковой арматуры в растянутой зоне. Оценка безотказной работы конструкции производилась по индексу надежности β , который определяется по формуле

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{M} \cdot D(M)}{\sqrt{S_M^2 + S_R^2}}, \quad (10)$$

где \bar{R} , \bar{M} – средние значения величин R и M ;

S_M и S_R – стандартные отклонения величин M и R .

Полученные значения β не должны превышать нормативные значения индекса надежности, прописанные Еврокодом: для первой группы предельных состояний $\beta_{n1} = 3,8$; для второй $\beta_{n2} = 2,5$.

Средние значения геометрических и прочностных параметров случайных величин приняты по экспериментальным данным. Результаты расчета надежности изгибаемого элемента серии С-1 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Оценка надежности изгибаемого элемента из условия прочности нормальных сечений по экспериментальным прочностным параметрам

№ п/п	Параметры	R_s	A_s	h_0	b	R_b	F	L
1	Единица измерения	кг/см ²	см ²	см	см	кг/см ²	кг	см
2	Средние значения, m	11 987,5	0,204 1	12,5	12	274,7	396*	90
3	Коэфф. вариации, v	0,12	0,05	0,05	0,04	0,13	0,2	0,04
4	Среднеквадратическое отклон., S	1 438,5	0,010	0,625	0,48	35,711	79,2	3,6
5	Отклонение S' от M и R	3 452,1	1 438,3	1 529,2	36,31	118,03	2 376	475,2
6	$\frac{S'}{M(R)}$, %	11,63	4,84	5,15	0,122	0,39	20	4

Примечание: * – Предпоследняя ступень нагружения экспериментальной балки.

По формуле (10) при $D(M) = 1$ и значениям параметров, приведенным в таблице 3, определен индекс надежности $\beta_{эк}$:

$$\beta_{эк} = 3,77 < \beta_{n1} = 3,8.$$

Дополнительно выполнена оценка надежности изгибаемого элемента по расчетным прочностным параметрам. Анализ значений эксплуатационной надежности показал, что снижение прочностных параметров материалов от средних до расчетных дает запас прочности по нагрузке в 57 %.

Выполнен расчет индекса надежности при воздействии агрессивной среды, который составил $\beta_1 = 3,62$.

Предложен метод решения задачи прогнозирования ресурса конструкции, определения ее конструктивных параметров из условия обеспечения нормативного индекса надежности $\beta_1 \geq 3,62$ при заданном сроке нормальной эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. В результате анализа отечественной и зарубежной литературы по применению композитной арматуры в строительной практике установлено, что применение стеклопластиковых армирующих элементов показало их высокую эффективность при работе конструкций в условиях действия агрессивных сред. Замена стальной арматуры на композитную в армобетонных строительных конструкциях сдерживается их низкой температурной устойчивостью, а также пониженной жесткостью армирующих элементов на полимерной основе. Метод экспериментального определения расчетных характеристик прочности при

сжатии, растяжении, модуля упругости композитной арматуры достаточно сложен и не обеспечивает гарантированной надежности.

2. Механические свойства композитной арматуры (модуль упругости, пределы прочности при сжатии и растяжении) предлагается определять путем испытания на продольный изгиб. Предлагаемый метод отличается хорошей статистической воспроизводимостью данных, а также возможностью проводить испытания в условиях действия агрессивных сред.

3. Разработаны составы эпоксидных композитов для армирующих элементов с повышенными значениями температурной устойчивости (до 80 °С) и повышенным значением модуля упругости (в 1,5 раза).

4. В результате экспериментальных исследований по прочности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых бетонных балок, армированных стеклопластиковыми арматурными стержнями, выявлены два основных вида разрушения: по нормальным сечениям в результате разрыва рабочей растянутой арматуры; по наклонным сечениям с раздроблением бетона сжатой зоны. Разрушение по нормальным сечениям происходит в результате разрыва арматуры при низких коэффициентах армирования ($\mu = 0,12 \%$). С увеличением коэффициента армирования до 0,49 % разрушение происходит по наклонной трещине.

5. Экспериментально установлено, что изгибаемые элементы с композитной стеклопластиковой арматурой имеют повышенную деформативность. Анализ полученных данных позволяет рекомендовать композитную арматуру для армирования бетонных конструкций, к которым не предъявляются жесткие требования по прогибам, трещиностойкости и огнестойкости.

6. Выполнен анализ экспериментальных диаграмм деформирования бетона при сжатии, полученных в условиях скоростной записи значений усилий и деформаций, показавший, что процесс разрушения является дискретным, описывается фрактальной линией, представленной микромасштабными дискретными диаграммами деформирования, которые, вероятно, соответствуют разрушению структурного элемента.

7. Разработаны модели деградации изгибаемых элементов из цементного бетона, армированных композитной стеклопластиковой арматурой, позволяющие прогнозировать изменения несущей способности, и возрастания прогибов в условиях действия агрессивных сред.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы

Для увеличения экономической эффективности применения композитных стержней необходимо провести исследование работы изгибаемых элементов: с предварительно напряженной композитной арматурой; с комбинированным армированием элементов и внешним эпоксидным покрытием при действии сильноагрессивных сред.

Для более точной оценки напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности необходимо внедрить в российские расчетные программные комплексы

аналитические зависимости напряжений от деформаций цементного бетона, предложенные отечественными учеными, которые откроют новые возможности при проектировании и детальном анализе работы конструктивных элементов, а также модели деградации прочности нормальных и наклонных сечений, позволяющие прогнозировать проектный и остаточный ресурс конструкций в зависимости от длительности действия среды и степени ее агрессивности.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных изданиях

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Работа балок, армированных композитной стеклопластиковой арматурой / В. П. Селяев, М. Ф. Алимов, Р. Н. Парамонов [и др.] // Регион. архитектура и стр-во. – 2013. – № 3. – С. 67–73 (ИФ РИНЦ – 0,293; 0,88 п. л. / 0,18 п. л.).

2. Исследование свойств волокнистых композитов методом продольного изгиба / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов, И. Н. Шабаев // Регион. архитектура и стр-во. – 2014. – № 2. – С. 5–15 (ИФ РИНЦ – 0,293; 1,38 п. л. / 0,34 п. л.).

3. Исследование свойств эпоксидной матрицы для композитной арматуры / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов, И. Н. Шабаев // Регион. архитектура и стр-во. – 2015. – № 2 (23). – С. 5–15 (ИФ РИНЦ – 0,293; 1,38 п. л. / 0,34 п. л.).

4. Анализ физических характеристик диаграмм деформирования цементных композитов при сжатии / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов, Е. Л. Кечуткина // Academia. Архитектура и стр-во. – 2016. – № 1. – С. 129–133 (ИФ РИНЦ – 0,721; 0,63 п. л. / 0,16 п. л.).

5. Оценка остаточного ресурса железобетонных изгибаемых элементов, подверженных действию хлоридной коррозии / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов, Е. В. Сорокин // Стр-во и реконструкция. – 2017. – № 6 (74). – С. 49–58 (ИФ РИНЦ – 0,388; 0,62 п. л. / 0,16 п. л.).

6. Оценка надежности железобетонных изгибаемых элементов, работающих в условиях действия агрессивных сред / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов, А. О. Горенков // Регион. архитектура и стр-во. – 2018. – № 4 (37). – С. 103–108 (ИФ РИНЦ – 0,293; 0,75 п. л. / 0,19 п. л.).

7. Оценка ресурса железобетонного изгибаемого элемента, подверженного действию хлоридной коррозии, по прочности наклонного сечения / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов [и др.] // Регион. архитектура и стр-во. – 2018. – № 3 (36). – С. 104–115 (ИФ РИНЦ – 0,293; 1,50 п. л. / 0,30 п. л.).

8. Влияние вида функциональной зависимости « $\sigma - \varepsilon$ » на расчетные прогибы пластины / В. П. Селяев, Е. В. Сорокин, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов // Регион. архитектура и стр-во. – 2018. – № 2 (35). – С. 17–25 (ИФ РИНЦ – 0,293; 1,13 п. л. / 0,28 п. л.).

9. Дифференцированный анализ диаграмм деформирования бетона при сжатии / В. П. Селяев, М. Ф. Алимов, П. В. Селяев, И. Н. Шабаев // Регион. архитектура и стр-во. – 2019. – № 2 (39). – С. 63–71 (ИФ РИНЦ – 0,293; 1,13 п. л. / 0,28 п. л.).

Публикации в других изданиях:

10. Алимов М. Ф. Определение механических характеристик стеклопластиковой арматуры методом продольного изгиба при действии агрессивной среды / М. Ф. Алимов, И. Н. Шабаев // Разработка эффективных авиационных, промышленных, электротехнических и строительных материалов и исследование их долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов : материалы Междунар. научн.-техн. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 81–87.

11. Шабаев И. Н. Сорбционные процессы и химическое сопротивление стеклопластиковой арматуры при выдержке в агрессивной щелочной среде NaOH (рН=12) / И. Н. Шабаев, М. Ф. Алимов // Разработка эффективных авиационных, промышленных, электротехнических и строительных материалов и исследование их долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов : материалы Междунар. научн.-техн. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2013. – С. 323–326.

12. Алимов М. Ф. Определение механических характеристик и свойств композитных арматурных стержней методом продольного изгиба / М. Ф. Алимов, В. П. Селяев, И. Н. Шабаев // Огарёв-Online. – 2014. – № С2 (40). – С.6.

13. Работа бетонных балок, армированных одиночными стержнями композитной стеклопластиковой арматурой при коэффициенте армирования по проекту СП «Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. Правила проектирования» / А. А. Соловьев, Р. Н. Парамонов, М. Ф. Алимов, И. Н. Шабаев // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы Тринадцатой Междунар. научн.-техн. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 238–245.

14. Работа бетонных балок, армированных одиночными стержнями композитной стеклопластиковой арматурой / Р. Н. Парамонов, А. А. Соловьев, М. Ф. Алимов, И. Н. Шабаев // Актуальные вопросы архитектуры и строительства : материалы Тринадцатой Междунар. научн.-техн. конф. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 229–234.

15. Селяев В. П. Исследование свойств механических характеристик однонаправленных стеклопластиковых арматурных стержней методом продольного изгиба / В. П. Селяев, М. Ф. Алимов, И. Н. Шабаев //

Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию заслуж. деятеля науки Рос. Федерации, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. Селяева Владимира Павловича. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – С. 152–157.

16. Исследование свойств волокнистых композитов на основе композитного связующего / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов [и др.] // ТестМат-2014 : сб. докл. IV Всерос. конф. по испытаниям и исслед. свойств материалов / ФГУП ВИАМ. – Геленджик, 2014. – С. 11.

17. Алимов М. Ф. Анализ кривых деформирования при растяжении и сжатии бетона / М. Ф. Алимов, И. Н. Шабаев // Материалы XX научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарёва : в 3 ч. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – ч. 3. – С. 213–220.

18. Алимов М. Ф. Обоснование выбора длины образца композитной арматуры при испытании методом продольного изгиба / М. Ф. Алимов, И. Н. Шабаев // Материалы XX научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева : в 3 ч. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2016. – ч. 3. – С. 206–211.

19. Анализ влияния водных растворов NaCl на прочность цементных композитов, армированных стеклопластиковыми стержнями / В. П. Селяев, И. Н. Шабаев, И. П. Терешкин, М. Ф. Алимов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию заслуж. деятеля науки Рос. Федерации, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. В. П. Селяева. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2019. – С. 342–352.

20. Алимов М. Ф. Расчет и оценка НДС фундаментной плиты с учетом физической нелинейности / М. Ф. Алимов, П. В. Селяев // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию заслуж. деятеля науки Рос. Федерации, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. В. П. Селяева. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2019. – С. 24–30.

21. Алимов М. Ф. Имитационная модель послойной деградации при прогнозировании долговечности железобетонных конструкций / М. Ф. Алимов // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию заслуж. деятеля науки Рос. Федерации, акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. В. П. Селяева. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2019. – С. 18–24.

Патент РФ на полезную модель:

Патент на полезную модель 150463 Российская Федерация, МПК: E04C5/07. Арматура композитная / В. П. Селяев, Т. А. Низина, Д. Р. Низин,

М. Ф. Алимов, И. Н. Шабает; заявитель и патентообладатель Нац. исслед. Мордов. гос. ун-т им. Н. П. Огарёва. – № 2014131171/03 ; Регистрация 28.07.2014. – 5 с.

Алимов Марат Фатихович

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСНОЙ РАБОТЫ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ И
КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ В ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТАХ,
РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИИ ДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.01.2022. Объем 1,5 п. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 47.
Типография Издательства Мордовского университета
430005, г. Саранск, ул. Советская, 24