

На правах рукописи



АМЕЛИН ПАВЕЛ АНДРЕЕВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ КОРРОЗИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫХ
ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,
УСИЛЕННЫХ ВНЕШНИМ ПОЛИМЕРКОМПОЗИТНЫМ
АРМИРОВАНИЕМ**

2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2025

Работа выполнена на кафедре строительства и городского хозяйства
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова».

Научный руководитель:	Римшин Владимир Иванович доктор технических наук, профессор член-корреспондент РААСН
Официальные оппоненты:	Трекин Николай Николаевич доктор технических наук, профессор АО «ЦНИИПромзданий», заместитель генерального директора по научной работе Попов Владимир Мирович кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВО «Санкт- Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Защита состоится «30» июня 2025 г. на заседании
диссертационного совета Д39.1.001.01, созданного на базе Научно-
исследовательского института строительной физики Российской
академии архитектуры и строительных наук (ФГБУ «НИИСФ
РААСН»), по адресу: 127238, г. Москва, Локомотивный пр., д. 21,
светотехнический корпус, к.205, тел.: (495) 482-40-76, факс: (495) 482-
40-60, e-mail: niisf@niisf.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-методическом
фонде НИИ строительной физики РААСН и на сайте <https://niisf.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д39.1.001.01



Шмаров Игорь Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования.

Эксплуатация железобетонных изгибаемых элементов зданий и сооружений различного назначения проходит под влиянием агрессивных несиловых воздействий, приводящих к возникновению коррозионных процессов в бетоне и арматуре, преждевременному достижению в конструкциях предельных состояний.

Конструкции морских сооружений, мостов и паркингов, станций обеззараживания, резервуаров, некоторых химических предприятий, большинства монолитных зданий, строящихся в зимний период, подвергаются постоянному воздействию агрессивных сред. С целью увеличения срока эксплуатации поврежденных железобетонных элементов современным решением является использование полимеркомпозитных материалов на основе стекло- и углепластиков при проведении ремонтно-восстановительных работ, поскольку данные материалы имеют высокие показатели прочности на растяжение, малый вес и высокую степень коррозионной стойкости.

На сегодняшний день достаточно исследованы процессы определения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций, поврежденных коррозией, существуют работы по исследованию усиления железобетонных конструкций под нагрузкой. Однако на данный момент не в полной мере изучена методика, прогнозирующая несущую способность коррозионно-поврежденных изгибаемых элементов после их усиления внешним полимеркомпозитным армированием.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами определения прочности изгибаемых железобетонных элементов при совместном действии эксплуатационных и средовых нагрузок посвящены работы Бондаренко В.М., Римшина В.И., Селяева В.П., Трекина Н.Н., Колчунова В.И., Чиркова В.П., Овчинникова И.Г., Попеско А.И., Смоляго Г.А., Леоновича С.Н., Mangat P.S., Elgarf M.S. и др.

Развитие и применение полимеркомпозитного армирования в элементах, а также при усилении железобетонных конструкций стало возможным благодаря теоретическим и экспериментальным работам Маиляна Д.Р., Морозова В.И., Меркулова С.И., Римшина В.И., Мирсаяпова И.Т., Клевцова В.А., Польского П.П., Esfahani M.R., Rahimi H., Ritchie P.A. и др.

Целью диссертационного исследования является совершенствование методики расчета прочности коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним полимеркомпозитным армированием.

Для достижения поставленной цели необходимо решить поставленные **задачи:**

- выполнить анализ накопления коррозионных повреждений бетона и арматуры на железобетонные элементы конструкций;
- исследовать влияние внешнего полимеркомпозитного армирования из углепластика на рост прочности изгибаемых элементов;

- совершенствовать методику расчета прочности элементов, поврежденных от воздействия агрессивной среды и усиленных полимерными композитами;

- провести экспериментальные исследования прочности железобетонных изгибаемых элементов трех рабочих состояний: работающих в нормальных эксплуатационных условиях; подверженных коррозионному воздействию агрессивной среды; усиленных внешним композитным армированием после повреждения вследствие протекания коррозионных процессов в арматуре и бетоне;

- подтвердить корректность предложенной методики расчета и алгоритма программного расчета проведением экспериментальных исследований, численного компьютерного моделирования и нейросетевого прогнозирования прочности коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним полимеркомпозитным армированием.

Объект исследования – коррозионно-поврежденные изгибаемые железобетонные элементы, усиленные внешним полимеркомпозитным армированием в растянутой зоне и приопорных боковых гранях.

Предмет исследования – прочность коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним полимеркомпозитным армированием.

Научно-техническая гипотеза заключается в предположении зависимости влияния коррозионного повреждения бетона и арматуры, а также внешнего полимеркомпозитного армирования на прочность изгибаемых железобетонных элементов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- совершенствована методика расчета прочности коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, в части учета уменьшения площади поперечного сечения стальной арматуры и влияния внешнего полимеркомпозитного армирования;

- экспериментально установлено влияние внешнего полимеркомпозитного армирования на рост прочности коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов;

- исследован способ локального усиления растянутой зоны изгибаемого железобетонного элемента;

- реализована нейросетевая модель для определения прочности элементов, поврежденных от воздействия агрессивной среды и усиленных полимерными композитами, зависящая от их геометрических и физико-механических характеристик.

Основные методы исследования. Методология диссертационного исследования обеспечивается общенаучными методами сбора, анализа и сравнения теоретических и экспериментальных данных отечественных и зарубежных ученых, имеющих отношение к объекту исследования.

Теоретическое описание объекта диссертационной работы основывалось на методе расчета по нелинейной деформационной модели. Для получения искомых величин используется математический

итерационный метод. В экспериментальной части диссертационной работы применялись методы натурального моделирования и математической статистики.

Численное моделирование работы усиленного железобетонного элемента выполнялось с помощью программных средств, основанных на методе конечных элементов и искусственных нейронных сетей.

Практическая значимость исследования заключается в совершенствовании подходов к проектированию изгибаемых железобетонных элементов, позволяющему учитывать коррозионные повреждения при устройстве внешнего полимеркомпозитного армирования. Локальное усиление растянутой зоны железобетонного элемента позволит снизить материалоемкость полимеркомпозитного усиления железобетонных элементов при требуемой механической обеспеченности.

Положения, выносимые на защиту:

- методика и алгоритм расчета прочности коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, в части учета уменьшения площади поперечного сечения стальной арматуры и влияния внешнего полимеркомпозитного армирования;

- результаты экспериментальных исследований прочности железобетонных изгибаемых элементов, работающих в нормальных эксплуатационных условиях, подверженных коррозионному воздействию агрессивной среды и усиленных внешним композитным армированием после повреждения вследствие протекания коррозионных процессов в арматуре и бетоне;

- результаты численных исследований изгибаемых железобетонных элементов, имеющих коррозионные повреждения арматуры и бетона, в последствии усиленных полимеркомпозитными материалами;

- нейросетевая модель прогнозирования прочности изгибаемых элементов, поврежденных от воздействия агрессивной среды и усиленных полимерными композитами, зависящая от их геометрических и физико-механических характеристик.

Степень достоверности научных положений и результатов. Достоверность проведенных исследований основана на использовании общепризнанных методов строительной механики, сопротивления материалов, математической статистики, постулатов теории железобетона, использованием, поверенного измерительного оборудования, сертифицированных расчетно-вычислительных комплексов, верификацией экспериментальных и численных результатов исследований.

Личный вклад автора. Личный вклад состоит в получении, анализе исходных теоретических данных, дополнении расчетной модели, личном выполнении всех экспериментов, обработке результатов, а также формулировке выводов, составляющих научную новизну и подтверждающих теоретическую и практическую значимость работы.

Апробация научно-исследовательской работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: VI, VII, VIII Международных научно-практических конференциях «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2022, 2023, 2024); XXIII Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» (Тула, 2022); Международном студенческом строительном форуме – 2022 (Белгород, 2022); Международных академических чтений «Безопасность строительного фонда России. VIII» (Курск, 2023); Международной научно-технической конференции «Расширение применения местных сырьевых материалов и отходов предприятий Республики Мордовия при изготовлении строительных материалов и изделий» (Саранск 2022); V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Строительство. Архитектура. Дизайн» (Курск, 2024); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2024); Международной научной конференции «Железобетонные и каменные конструкции (ЖБК-2024)» (Казань, 2024).

Внедрение результатов исследований. Результаты настоящих исследований апробированы в производственных условиях в ООО «Центрогипсруда» и ООО «Чукотстройинвест» при разработке проектов усиления железобетонных конструкций, а также в учебном процессе БГТУ им. В. Г. Шухова.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 25 научных публикациях, 8 из которых в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 работы в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 1 свидетельство о государственной регистрации Базы данных.

Диссертационная работа выполнялась в период с 2019 по 2025 г. на кафедре строительства и городского хозяйства ФГБОУ ВО «Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 155 наименований и четыре приложения. Работа изложена на 175 страницах, содержит 79 рисунков, 31 таблицу и 23 страницы приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и проанализирована степень разработанности темы научных исследований, представлены цель и задачи работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов, подверженных влиянию агрессивных сред. Рассмотрены кинетика протекания коррозионных процессов в железобетонных

элементах от воздействия хлоридной среды, модели поведения бетона и арматуры при воздействии на них хлоридной агрессивной среды, физические и расчетные модели силового сопротивления железобетонных элементов, подверженных хлоридной коррозии.

Проведен обзор и анализ научных работ по усилению железобетонных элементов с помощью полимеркомпозитных материалов. Анализ научных и экспериментальных работ по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, показали важность учета влияния коррозии на конструктивные характеристики железобетонных конструкций с определенными характеристиками и целесообразность применения систем усиления из полимеркомпозита. Наиболее рациональным является применение в качестве усиления внешним армированием композитных материалов на основе углеродных волокон.

Во второй главе приведена методика расчета прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, находящихся под воздействием хлоридной агрессивной среды, с учетом внешнего полимеркомпозитного усиления, основанная на нелинейной деформационной модели железобетона с учетом следующих предположений, рабочих гипотез и допущений:

- предполагается, что условие совместности деформаций конструкционных материалов действительно для рассматриваемого сечения;
- справедлива гипотеза плоских сечений с учетом возможной деформации;
- для расчета принимается сечение с трещинами;
- связь между напряжениями и деформациями бетона описывается квазилинейным уравнением В.М. Бондаренко:

$$\sigma_b(t) = \frac{k\varepsilon(t)e^{m(t)\varepsilon(t)}}{\left[\frac{1}{E_m^0(t)} + C^*(t, t_0) - \int_{t_0}^t \frac{\sigma(\tau)\partial}{\sigma(\tau)\partial\tau} C^*(t, \tau) d\tau \right]}, \quad (1)$$

где $\sigma_b(t)$ – напряжения в бетоне в определенный момент времени, МПа;

$\varepsilon(t)$ – полные деформации бетона в определенный момент времени, k – эмпирический параметр деформирования; m – параметр нелинейности; $C^*(t, \tau)$ – начальная мера деформаций простой ползучести.

- связь между напряжениями и деформациями арматуры описывается диаграммой Прандтля:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & 0 < \varepsilon \leq \varepsilon_{упр} \\ \sigma_m, & \varepsilon > \varepsilon_{упр} \end{cases}. \quad (2)$$

- связь между напряжениями и деформациями полимеркомпозитного армирования описывается как для линейно-упругих материалов законом Гука:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f, \quad (3)$$

где E_f – модуль упругости композитного материала, МПа;
 ε_f – деформация волокон в определенный момент времени;

– внешняя нагрузка на элемент и концентрация агрессивной среды около сечения рассматриваются как постоянные на протяжении всего периода наблюдений, и средовые воздействия начинают проявляться при относительно стабилизированном напряженно-деформированном состоянии сечения;

– мерой коррозионных повреждений бетона в расчете выступают глубина проникновения и функция коэффициента повреждения, определяемые согласно кинематической модели В.М. Бондаренко:

$$\sigma_{corr} = \sigma_b(t) \cdot K(z), \quad (4)$$

где $\sigma_b(t)$ – модель деформирования непораженного бетона, МПа;
 $K(z)$ – функция повреждения для слоя толщиной z (рис. 1), который находится в пределах от 0 до 1 и в общем виде определяется зависимостью:

$$K(z) = \sum_{i=0}^{i=3} a_i \cdot z^i, \quad (5)$$

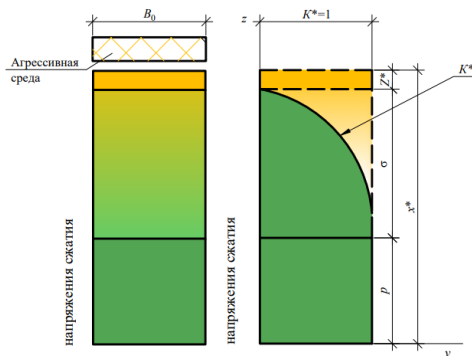


Рисунок 1 – Схема изменения прочностных характеристик бетона по поперечному сечению и зависимости глубины коррозии от напряжений

где z – ордината, отсчитываемая от оси силовых напряжений поврежденного коррозией бетонного элемента;

a_i – коэффициенты степенного ряда, которые находят при фиксированных значениях K_i .

– коррозионные повреждения арматуры учитываются уменьшением площади ее поперечного сечения согласно уравнения:

$$A_{s,cor} = A_s - A_{cor}, \quad (6)$$

где A_s – изначальная площадь поперечного сечения стальной арматуры, м^2 ; A_{cor} – расчетная площадь коррозионных повреждений поперечного сечения стальной арматуры, м^2 ;

– принимается сплошная неравномерная модель коррозионного износа стержня, определяемая зависимостью:

$$A_{cor} = \pi \left(r \delta_s - \frac{\delta_s^2}{4} \right), \quad (7)$$

где r – изначальный радиус стержня, мм; δ_s – глубина коррозионных повреждений, мм;

– принимается модель определения глубины коррозии стальной арматуры, которая описана Овчинниковым И.Г.:

$$\delta_s(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_{inc} \\ \frac{\delta_{s,0} \cdot (t - t_{inc})}{T + (t - t_{inc})}, & t > t_{inc} \end{cases}, \quad (8)$$

где $\delta_{s,0}$, T – опытные константы повреждений, устанавливаемые из экспериментальных данных; t_{inc} – время начала процесса коррозии, с.

– толщина, модули упругости, коэффициенты Пуассона и прочие характеристики материала усиления принимаются как для системы в целом (армирующих волокон пластика).

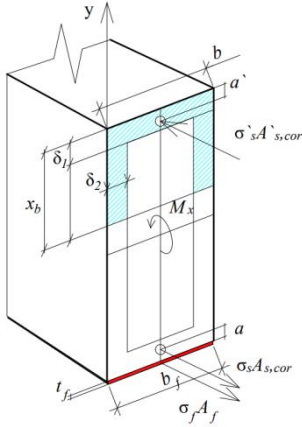


Рисунок 2 – Расчетная схема сечения усиленного после повреждения элемента

Для расчета прочности нормальных сечений, поврежденных коррозией, элементов с трещинами, предлагается частный случай модели деформирования В.В. Белова и С.Е. Никитина.

Роль внешнекомпозитного усиления изгибаемого элемента определяется добавлением в уравнения равновесия усилий в композитном армировании на расстоянии $h/2$ от месторасположения оси симметрии (рис. 2).

Для нормального сечения разрешающие системы уравнений модели деформирования усиленных коррозионно-поврежденных железобетонных элементов составляют условия статической эквивалентности $\Sigma N_{str} = 0$ и $\Sigma M_{str} = 0$.

В результате получаем зависимости:

$$N_{str} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} \sigma_{b,cor}(y) dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_{b,cor}(y) dy + (b - 2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_b(y) dy + A'_{s,cor} \cdot \sigma'_s - A_{s,cor} \cdot \sigma_s - A_f E_f \varepsilon_f, \quad (9)$$

$$M_{str} = b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} \sigma_{b,cor}(y) \cdot y dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_{b,cor}(y) \cdot y dy + (b - 2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^{x_b} \sigma_b(y) \cdot y dy + A'_{s,cor} \cdot \sigma'_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a \right) - A_{s,cor} \cdot \sigma_s \cdot \left(\frac{h}{2} - a \right) - A_f E_f \varepsilon_f \frac{h}{2}, \quad (10)$$

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bts}} = \frac{x_b}{h - x_b}, \quad (11)$$

где h – высота прямоугольного сечения, мм; b – ширина прямоугольного сечения, мм; σ'_s, σ_s – напряжения в сжатой и растянутой арматуре, МПа; a – расстояние от равнодействующей усилий в растянутой арматуре до ближайшей грани сечения, мм; ε_b –

относительная деформация сжатия бетона, в среднем сечении; $\sigma_{b,cor}, \sigma_b$ – напряжение в бетоне поврежденной и неповрежденной зоны соответственно, МПа; δ_1, δ_2 – глубина повреждения бетонного сечения в сжатой зоне и боковых гранях, мм; A_f – площадь поперечного сечения композитного материала, мм²; E_f – модуль упругости композитного материала, ГПа; ε_{bts} – общая относительная деформация растяжения бетона усиленного элемента:

$$\varepsilon_{bts} = \varepsilon_f + \varepsilon_{bt}, \quad (12)$$

где ε_{bt} – относительная деформация растяжения бетона, до применения композитного усиления сечения; ε_f – относительная деформация композитного материала.

Для проведения итерационного счета запишем уравнения, определяющие продольную силу N_{str} и изгибающий момент $M_{x,str}$, через изгибные жесткости D , кривизну $1/r_x$ и относительной деформации волокна в начальной точке ε_0 :

$$N_{str} = D_{13} \frac{1}{r_x} + D_{33} \varepsilon_0, \quad (13)$$

$$M_{x,str} = D_{11} \frac{1}{r_x} + D_{13} \varepsilon_0. \quad (14)$$

С учетом усилий полимеркомпозитного материала изгибные жесткости равны:

$$\begin{aligned} D_{11} = & b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} E_{b,cor}^H(y) \cdot y^2 \cdot dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^x E_{b,cor}^H(y) \cdot y^2 \cdot dy + \\ & + (b - 2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^x E_b^H(y) \cdot y^2 \cdot dy + \alpha_s A_{s,cor}' E_s^H \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right)^2 \\ & - \alpha_s A_{s,cor} E_s^H \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right) - \alpha_f A_f E_f \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} D_{13} = & b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} E_{b,cor}^H(y) \cdot y \cdot dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^x E_{b,cor}^H(y) \cdot y \cdot dy + \\ & + (b - 2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^x E_b^H(y) \cdot y \cdot dy + \alpha_s A_{s,cor}' E_s^H \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right) \\ & - \alpha_s A_{s,cor} E_s^H \cdot \left(\frac{h}{2} - a\right) - \alpha_f A_f E_f \cdot \frac{h}{2} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} D_{33} = & b \cdot \int_{h/2}^{\delta_1} E_{b,cor}^H(y) \cdot dy + 2 \cdot \delta_2 \cdot \int_{\delta_1}^x E_{b,cor}^H(y) \cdot dy + \\ & + (b - 2 \cdot \delta_2) \cdot \int_{\delta_1}^x E_b^H(y) \cdot dy + \alpha_s A_{s,cor}' E_s^H - \\ & - \alpha_s A_{s,cor} E_s^H - \alpha_f A_f E_f, \end{aligned} \quad (17)$$

где $E_{b,cor}^H, E_b^H$ – нелинейные модули деформаций в бетоне сжатой и растянутой зоны поврежденной и неповрежденной зоны соответственно, МПа; E_s, E_s^H – модули деформаций арматуры растянутой и сжатой зоны, МПа; E_f – модуль упругости полимеркомпозитного материала, МПа; $\alpha_s, \alpha_s', \alpha_f$ – коэффициенты

приведения геометрических характеристик сжатой, растянутой, полимеркомпозитной арматуры.

В третьей главе для определения эффективности композитного усиления изгибаемых железобетонных элементов, поврежденных вследствие воздействия на них хлоридной коррозионной среды, проведены экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов при действии нагрузки.

Для решения поставленных задач разработана программа проведения эксперимента, в соответствие с которой предусматривалось проведение испытаний четырех серий изгибаемых элементов и вспомогательных образцов к ним, а именно:

- испытание вспомогательных бетонных образцов проектного класса по прочности на сжатие В20 в виде кубов размером $100 \times 100 \times 100$ мм и призм размером $100 \times 100 \times 400$ мм на сжатие, изгиб, определение начального модуля упругости в количестве шести образцов на серию;

- испытание вспомогательных образцов в виде арматурных стержней В500, А240 и А500 и однонаправленных тканых полос из углеродного волокна SikaWrap – 230 С на продольное растяжение;

- испытание контрольных изгибаемых элементов на статический изгиб до момента разрушения (серия БК);

- повреждение растянутой зоны сечения под воздействием хлоридной среды с последующим испытанием на статический изгиб до момента разрушения (серия БП);

- испытание на статический изгиб предварительно поврежденных под воздействием агрессивной среды железобетонных элементов, разгруженных и усиленных холстами из углеродного волокна (серии БПУ1 и БПУ2).

Для проведения эксперимента были изготовлены 12 опытных образцов железобетонных изгибаемых элементов в лаборатории завода АО «Белгородстройдеталь» (г. Белгород). Образцы были изготовлены из тяжелого бетона класса В20. Размеры опытных образцов составили $120 \times 220(h) \times 1290$ мм. Расчетный пролет составил 1100 мм. Опытные образцы балок армированы плоским сварным каркасом из арматурной стали А500 Ø12 мм в растянутой зоне и В500 Ø5 мм в сжатой зоне. В качестве поперечной арматуры приняты стержни из арматурной стали А240 Ø6 мм. Шаг поперечной арматуры по длине балки переменный: в крайних четвертях – 100 мм, в средних – 200 мм. Схема армирования образцов приведена на рис. 3.

Параллельно с основными образцами, были изготовлены и испытаны вспомогательные бетонные образцы – кубы и призмы размерами $100 \times 100 \times 100$ мм и $100 \times 100 \times 400$ мм соответственно из бетона класса по прочности на сжатие В20 с помощью универсальной гидравлической испытательной машины WEW-600D согласно ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 24452-80.

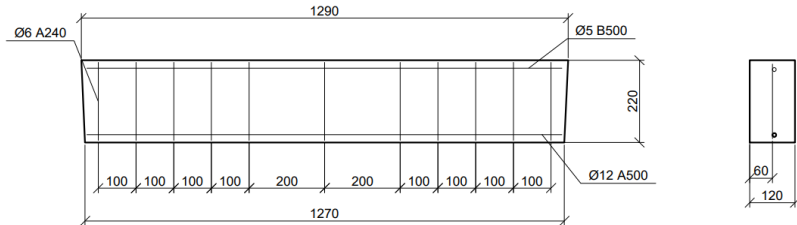


Рисунок 3 – Схема армирования исследуемой опытной конструкции

Испытание призм на растяжение с изгибом выполнялось на испытательном гидравлическом прессе П-50, с использованием оснастки для проведения четырехточечного изгиба. Результаты испытаний физико-механических характеристик применяемого бетона и представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики бетона

Проектный класс бетона на сжатие	Средняя кубическая прочность бетона R , МПа	Средняя призмная прочность бетона R_b , МПа	Начальный модуль упругости E_b , МПа	Прочность на растяжение при изгибе R_{bt} , МПа
B20	21,1	17,2	26 650	4,11

Результаты испытаний физико-механических характеристик стали A240, A500 и B500 представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Физико-механические характеристики арматуры

Класс арматуры	Предел текучести арматуры σ_y , МПа	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное удлинение δ_{200} , %
A240	243,16	319,6	11,5
A500	561,36	653,93	11
B500	-	723,04	10

Повреждение основных изгибаемых образцов осуществлялось в 5 % растворе хлористого натрия одновременно с использованием электрического источника питания для проведения катодно-анодного процесса. Для осуществления возможности протекания электрохимической коррозии, наружу балки из раствора была выведена арматура, являющаяся анодом. Также проводился периодический обрызг верхней и боковых граней элемента раствором 5 % хлористого натрия.

Усиление поврежденных железобетонных элементов производилось однонаправленными ткаными полосами из углеродного волокна SikaWrap - 230C в один слой в растянутой зоне для увеличения несущей способности поперечного сечения, а также поперечными U-образными хомутами для недопущения разрушения усиленного элемента по наклонному сечению. С целью определения физико-механических характеристик композитного материала для усиления были испытаны образцы полос ламелей, состоящих из

однаправленной ткани SikaWrap - 230C (углеродное волокно шириной 20 мм и длиной 500 мм), и пропитанных эпоксидным клеем FibArm Resin 530+, в количестве трех штук согласно ГОСТ 25.601-80.

Физико-механические характеристики композитного материала представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Физико-механические характеристики SikaWrap - 230C

Модуль упругости E_f , ГПа	Предел прочности при растяжении σ_f , МПа	Относительное удлинение ε_u , %
192,88	3450,7	1,87

Постоянными параметрами усиления в рамках испытаний были ширина и толщина продольного композитного армирования. Варьируемыми параметрами усиления в рамках испытаний были относительная длина участка усиления (L_{yc}/L) и угол наклона поперечного композитного армирования к продольной оси элемента α . Конструктивные схемы усиления изгибаемых элементов показаны на рис. 4.

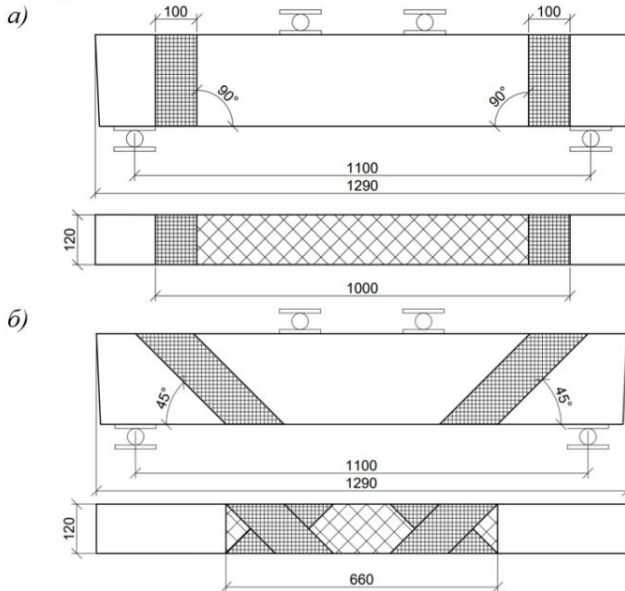


Рисунок 4 – Конструктивная схема опытных усиленных образцов:

а – серии БПУ1 ($L_{yc}/L = 1$; $\alpha = 90^\circ$), б – серии БПУ2 ($L_{yc}/L = 0,66/1$; $\alpha = 45^\circ$)

Конструкция усиления серии БПУ2 была определена на основании обеспечения прочности и экспериментальных данных изгибающих моментов серий БП и БПУ1.

Все образцы изгибаемых элементов четырех серий (обозначены как БК, БП, БПУ1, БПУ2) в ходе испытания были доведены до разрушения (рис. 5). Разрушение в элементах серии БК произошло вследствие

образования нормальных трещин с последующим выколом бетона сжатой зоны.

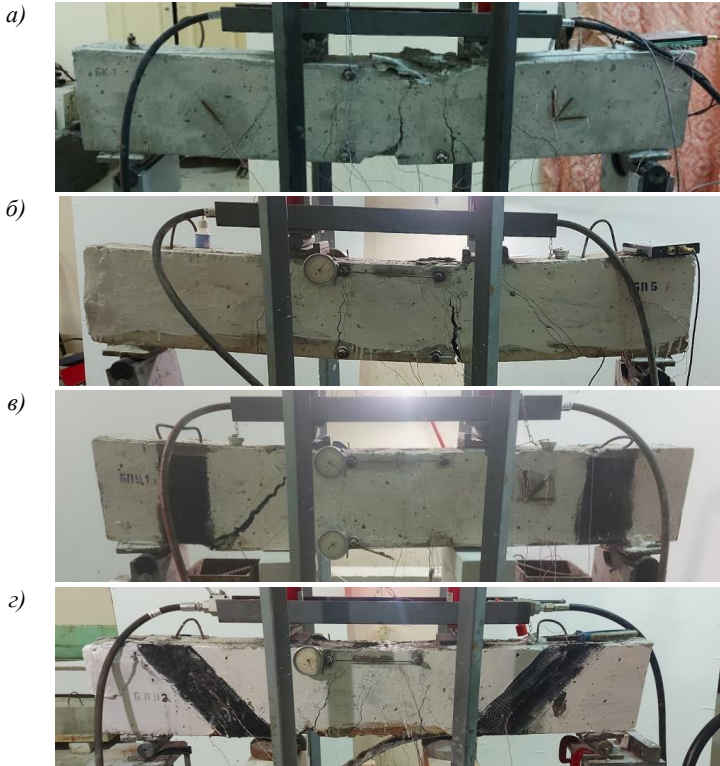


Рисунок 5 – Внешний вид образцов серий после разрушения:
а – БК, б – БП, в – БПУ1, з – БПУ2

Образцы изгибаемых элементов серии БП после первого этапа нагружения и прохождения электрохимической коррозии в хлоридной агрессивной среде совместно с источником питания имели характерные следы развития продуктов коррозии растянутой арматуры в бетоне. После прохождения процесса коррозии образцы были доведены до разрушения.

Характер разрушения образцов серии БП был иным, разрушение произошло в результате достижения арматурой растянутой зоны временного предела сопротивления арматуры. Остаточный диаметр в наиболее поврежденной части арматуры составил 9,3 мм.

Образцы изгибаемых элементов серии БПУ1 после прохождения этапа электрохимической коррозии, в таких же условиях, как образцы серии БП, были усилены в растянутой зоне на величину расчетного пролета.

Во избежание преждевременного отслаивания композита от бетона, концы элементов усиления в продольном направлении были заанкерованы приклеиванием трехсторонних хомутов в поперечном направлении шириной 100 мм. После усиления образцы были доведены до разрушения. Образцы разрушились по наклонному сечению от края поперечного хомута до точки приложения нагрузки.

Образцы изгибаемых элементов серии БПУ2 после прохождения этапа электрохимической коррозии, были усилены в растянутой зоне холстами длиной 660 мм, определенной на основании обеспечения прочности на приопорных участках и экспериментальных данных изгибающих моментов серий БП и БПУ1. Поперечное армирование выполнялось холстами шириной 100 мм, расположенными под 45% к продольной оси элемента и нахлестом в растянутой зоне. После усиления образцы были доведены до разрушения. Образцы разрушились в результате обрыва продольного холста растянутой зоны в месте примыкания к поперечному армированию.

График изменения разрушающего момента экспериментальных образцов представлен на рис. 6.

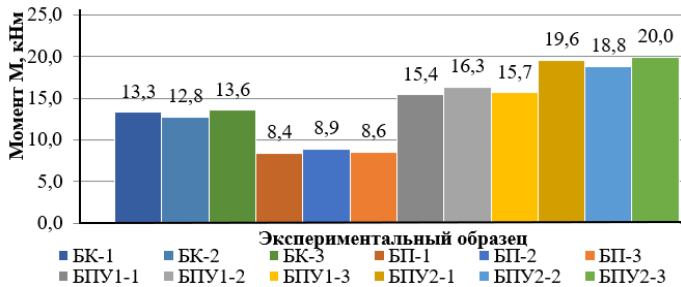


Рисунок 6 – Зависимость изменения прочности серий БК, БП, БПУ1, БПУ2

Фиксация прогибов на каждом этапе загрузки позволила построить экспериментальные графики « $M - f$ » (момент – прогиб) растянутой зоны, приведенные на рис. 7.

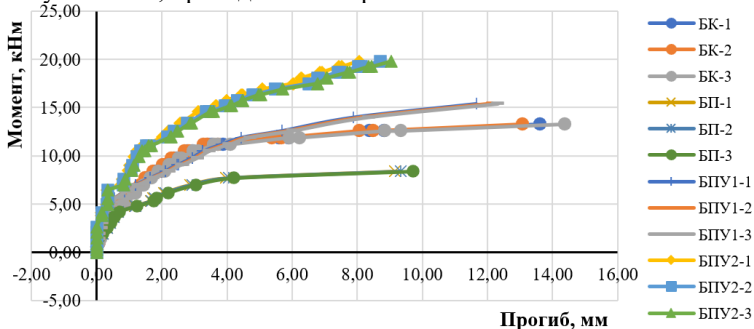


Рисунок 7 – Опытные зависимости « $M - f$ » (момент – прогиб) растянутой зоны

Диаграммы распределения относительных деформаций по высоте поперечного сечения балок на всех этапах нагружения представлены на рис. 8.

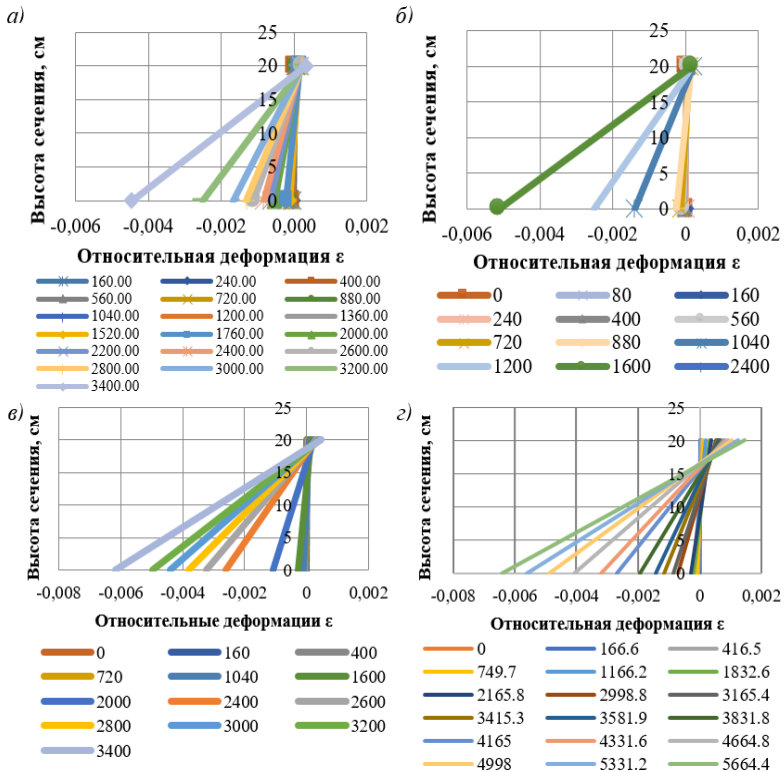


Рисунок 8 – Деформации бетона по высоте сечения элементов серий:
а – БК, б – БП, в – БПУ1, г – БПУ2

В четвертой главе приведены численные исследования изгибаемых железобетонных элементов, подверженных воздействию агрессивной среды и усиленных внешним полимеркомпозитным армированием, а также сопоставлены полученные выводы с результатами экспериментальных и численных исследований.

В рамках численных исследований проводился расчет несущей способности:

– согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» для контрольных и поврежденных образцов, для внешне усиленных образцов согласно СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами»;

– согласно методики расчета прочности элементов, поврежденных от воздействия хлоридосодержащей среды и усиленных полимерными композитами, изложенной в главе 2;

– в программном комплексе конечно-элементного моделирования Simulia Abaqus;

– посредством нейросетевого прогнозирования в программном комплексе STATISTICA Neural Network.

Создание конечно-элементной модели экспериментальных образцов с помощью программного комплекса Simulia Abaqus проходило в несколько этапов. Геометрические характеристики железобетонной балки задавались объемными конечными элементами $10 \times 10 \times 10$ мм для тела бетона и стержневыми элементами длиной 10 мм для стержней арматуры соответственно (рис. 9).

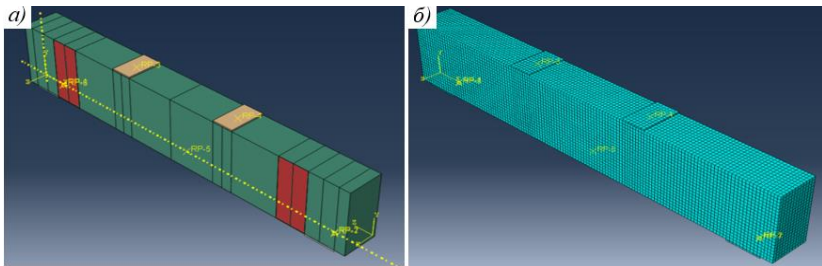


Рисунок 9 – 3D вид исследуемых железобетонных образцов: *а* – сводная геометрическая модель; *б* – конечно-элементная модель

Физико-механические характеристики бетона задавались упругими и пластичными свойствами. Нелинейное поведение бетона задавалось с помощью модели пластичного разрушения бетона с повреждениями (CDP). Исходные зависимости сжимающих и растягивающих напряжений σ_c и σ_t , а также деформации бетона при сжатии и растяжении ε_c и ε_t получены из экспериментальной диаграммы состояния бетона.

Для арматуры так же использовалась комбинация упругих свойств и модели пластичности металла. Нагружение балки выполнялось с помощью приращения по 5 % от разрушающей нагрузки P_{cp} . Задание статической нагрузки осуществлялось с помощью двух стальных пластин $120 \times 50 \times 20$ мм, которые находились по краям центральной трети расчетного пролета. Расчетная схема - шарнирно опертая балка на двух опорах. Первая опора ограничивалась в перемещении по плоскостям U_1 , U_2 , U_3 , вторая – по плоскостям U_1 и U_2 . Далее определялись места контактного взаимодействия исследуемой балки, опор и элементов приложения нагрузки. В конечном итоге модель тела бетона и опор разбивалась на объемные конечные элементы арматура разбивалась на отрезки. В результате конечно-элементного расчета были получены распределения напряжений в бетоне и арматуре (рис. 10).

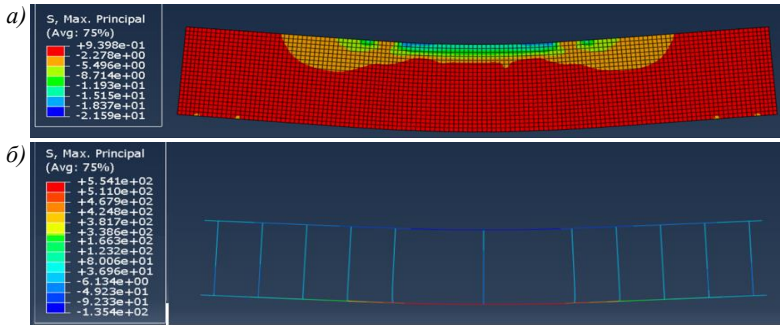


Рисунок 10 – Распределение напряжений по Мизесу, МПа:
а – бетона; б – арматуры

Для прогнозирования несущей способности железобетонных изгибаемых элементов также было применено математическое моделирование искусственными нейронными сетями (ИНС), созданными на основе данных, полученных в результате набора экспериментальных данных научных работ, проводивших испытания на изгиб железобетонных элементов с различной степенью повреждения и композитного усиления. Это позволило получить широкую выборку по всем показателям. Выборка включала в себя данные 283 испытания балок прямоугольного сечения.

Входной слой созданной ИНС (рис. 11) состоит из независимых переменных – призмной прочности бетона R_b (МПа), ширины поперечного сечения b (мм), высоты поперечного сечения h (мм), предела текучести стальной арматуры растянутой зоны R_s (МПа), коэффициента стального армирования μ_s (%), снижения площади поперечного сечения арматуры вследствие коррозии $\Delta A_{s,cor}$, прочности полимеркомпозитного холста R_f (МПа), коэффициента полимеркомпозитного армирования μ_f (%), расстояния от опоры до места приложения сосредоточенной силы l (мм). Выходной слой включает зависимые переменные – значения изгибающего момента M_{ult} (кН·м) и разрушающей нагрузки P_{ult} кН.

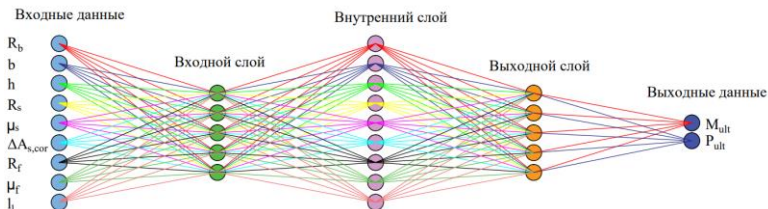


Рисунок 11 – Архитектура созданной нейронной сети

Для обучения нейронной сети применялся метод многократных подвыборок, архитектуру нейронной сети в виде многослойного персептрона, использующего от 5 до 30 нейронов на внутреннем слое сети. На основе анализа была выбрана одна нейросеть, имеющая

наибольшую степень соответствия фактическим значениям. Это подтверждается графиками для валидации набора данных нейросетевого прогнозирования, а именно гистограммой остатков распределения ошибок, соответствующему нормальному закону распределения Гаусса-Лапласа, а также зависимостью сравнения прогнозных и фактических значений (рис. 12).

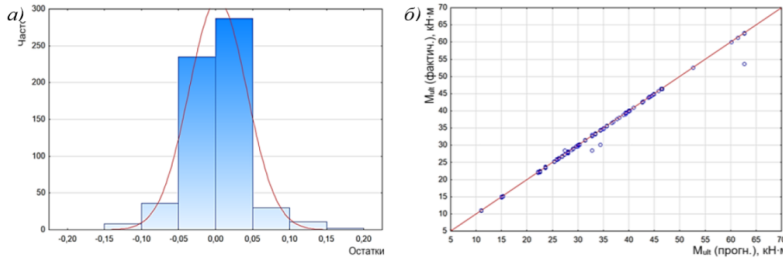


Рисунок 12 – Зависимости для валидации набора данных нейросетевого прогнозирования

Полученные регрессионные модели допускают среднюю абсолютную ошибку для набора данных изгибающего момента – 0,74 %; для разрушающей нагрузки – 0,84 %.

Итоговое сравнение теоретических, экспериментальных значений и результатов численных исследований приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Сравнение опытных и расчетных данных по прочности

Маркировка образца в эксперименте	Разрушающая нагрузка P_{ult} , кН						
	Опытные значения	Изменение прочности, %	Расчетные значения				
			По методике, основанной на СП 63 и 164	Результаты Simulia Abaqus	Согласно авторской методики	Нейро- сетевое прогнози- рование	
Образцы контрольной группы БК (Mult)							
БК-1	38,0	37,8	100,0	35,9	36,1	37,2	40,1
БК-2	36,6						
БК-3	38,9						
Общее отклонение, %				-5,0	-4,4	-1,6	6,3
Поврежденные образцы группы БП (Mult)							
БП-1	24,0	24,7	65,2	23,1	23,3	23,7	26,7
БП-2	25,4						
БП-3	24,6						
Общее отклонение, %				-6,2	-5,7	-3,9	9,0
Усиленные образцы группы БПУ1 (Qult)							
БПУ1-1	44,0	45,1	119,4	47,3	47,0	44,5	49,6
БПУ1-2	46,6						
БПУ1-3	44,9						
Общее отклонение, %				4,7	4,1	-1,5	9,4
Усиленные образцы группы БПУ2 (Mult)							
БПУ2-1	50,9	52,0	137,5	47,6	49,1	50,1	50,2
БПУ2-2	52,0						
БПУ2-3	53,1						
Общее отклонение, %				-8,4	-5,5	-3,6	-3,8

Согласно полученным данным, расчет образцов с помощью нейросетевого прогнозирования, возможен, как альтернатива нормативной методике и конечно-элементному расчету, в силу таких преимуществ, как большая гибкость в настройке параметров, учет многофакторности и адаптация под конкретные задачи и условия эксплуатации.

Сравнительный анализ прочности нормальных сечений образцов лабораторных балок, проведенный в рамках исследования, показал следующие результаты:

- традиционные методы расчета могут иметь значительные погрешности в условиях коррозионного воздействия;
- в отличие от нормативной, авторская методика продемонстрировала более высокую точность, это свидетельствует о том, что предложенные подходы к расчету прочности более адекватно учитывают особенности коррозионного повреждения;
- численное моделирование как инструмент для анализа прочности конструкций имеет высокую эффективность, однако оно все еще уступает авторской методике по точности;
- для повышения их точности в прогнозировании прочности необходима дальнейшая доработка и усовершенствование нейросетевых моделей.

Таким образом, результаты показывают, что авторская методика расчета прочности нормальных сечений является наиболее эффективной среди рассмотренных в работе подходов. Это открывает новые возможности для применения в проектировании и оценке состояния железобетонных конструкций, подверженных коррозии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические, экспериментальные и численные исследования прочности коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним полимеркомпозитным армированием, позволили получить следующие научные и практические результаты:

- на основе расчетной модели сечений с трещинами совершенствована методика определения прочности композитно-усиленных изгибаемых железобетонных элементов, подверженных совместному воздействию внешней нагрузки и агрессивной среды;
- проведены испытания на прочность железобетонных балок в средах, агрессивных по отношению к бетону и арматуре с последующим усилением их нормального и наклонного сечения. Испытания включали элементы, работающие в обычных условиях, подверженные коррозионному воздействию и усиленные полимеркомпозитами. Экспериментальные результаты подтвердили увеличение прочности поврежденных элементов после их усиления;
- на основе расчетной модели разработана программа расчета на ЭВМ для определения прочности композитно-усиленных изгибаемых

железобетонных элементов с коррозионными повреждениями бетона и арматуры;

- проведено конечно-элементное моделирование поведения изгибаемых железобетонных элементов, работающих в обычных условиях, подверженных коррозионному воздействию и усиленных полимеркомпозитами после предварительного повреждения;

- разработана нейросетевая модель для прогнозирования несущей способности изгибаемых железобетонных элементов.

Данное исследование вносит вклад в развитие методов повышения прочности и долговечности железобетонных конструкций, подверженных коррозионным повреждениям, и предлагает практические решения для их эффективного восстановления и усиления.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ:

***В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,
рекомендованных ВАК РФ***

1. **Амелин, П. А.** Численный расчет изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения в программной среде Abaqus / В. И. Римшин, **П. А. Амелин** // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2022. – Т. 18, № 6. – С. 552-563.

2. **Амелин, П. А.** Композитное усиление железобетонных изгибаемых элементов, поврежденных под воздействием хлоридной агрессивной среды / В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова, **П. А. Амелин**, Н. В. Фролов // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 1(20). – С. 29-34.

3. **Амелин, П. А.** Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, имеющих повреждения арматуры вследствие контакта с хлоридной агрессивной средой / В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова, **П. А. Амелин**, А. А. Крючков // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 3(22). – С. 138-146.

4. **Амелин, П. А.** Нейросетевое прогнозирование физико-механических характеристик композитных материалов используемых для усиления строительных конструкций / В. И. Римшин, А. К. Соловьев, Л. А. Сулейманова, **П. А. Амелин** // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 4(23). – С. 101-107.

5. **Амелин, П. А.** Нейросетевое прогнозирование несущей способности железобетонных элементов / П. А. Амелин, В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 11. С. 42–55.

6. **Амелин, П. А.** Прочность нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, поврежденных коррозией и усиленных внешним композитным армированием / П. А. Амелин, В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2024. – Т. 20. – №4. – С. 331-341.

7. **Амелин, П.А.** Прочность нормальных и наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, поврежденных коррозией и усиленных внешним композитным армированием / П. А. Амелин, В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 1. – С. 117–127.

8. **Амелин, П. А.** Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов в хлоридной агрессивной среде / В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова, П. А. Амелин, Д.С. Аноприенко // Строительная механика и конструкции. – 2025. – № 1(44). – С. 40-51.

В изданиях, индексируемых в базах данных Scopus

9. **Amelin, P. A.** Finite Element Modeling of the Work of Bent Reinforced Concrete Elements of Rectangular Section in the Abaqus Software Environment / P. A. Amelin, V. I. Rimshin, A. A. Kryuchkov, D. V. Obernikhin // Innovations and Technologies in Construction. 2023. Vol. 307. P. 268-275.

10. **Amelin, P.** Rational Design of Composite Strengthening of Reinforced Concrete Elements for Experimental Research / V. Rimshin, **P. Amelin** // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Vol. 372. P. 281-290.

В сборниках конференций

11. **Амелин, П. А.** Развитие процессов коррозии железобетона в условиях хлоридной агрессивной среды / Л. А. Сулейманова, **П. А. Амелин** // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. VI Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры строительства и городского хозяйства, Белгород. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – Т. 1. – С. 131-135.

12. **Амелин, П. А.** Электрохимическое течение коррозии арматуры железобетонных элементов при воздействии хлоридной агрессивной среды / П. А. Амелин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук: сб. докл. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – Ч. 6. – С. 22-28.

13. **Амелин, П. А.** Анализ экспериментальных исследований по усилению железобетонных конструкций внешним композитным армированием / П. А. Амелин // VII Международный студенческий строительный форум – 2022: сб. докл. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 13-20.

14. **Амелин, П. А.** Расчет усиления изгибаемых железобетонных элементов, имеющих повреждения стальной арматуры, внешним композитным армированием / В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова, **П. А. Амелин** // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: сб. материалов XXIII Международной научно-технической конференции. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. – С. 117-122.

15. **Амелин, П. А.** Материалы и строительные конструкции, армированные композитной неметаллической фиброй или ее близкими

аналогами / В. И. Римшин, М. Н. Семенова, М. А. Логунова [и др.] // Расширение применения местных сырьевых материалов и отходов предприятий Республики Мордовия при изготовлении строительных материалов и изделий: Материалы Международной научно-технической конференции. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2023. – С. 326-329.

16. **Амелин, П. А.** Расчетное обоснование экспериментальных исследований по усилению изгибаемых железобетонных элементов внешним композитным армированием / П. А. Амелин, Л. А. Сулейманова // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – Т. 1. – С. 14-22.

17. **Амелин, П. А.** Расчет прочности наклонных сечений поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним композитным армированием / Л. А. Сулейманова, **П. А. Амелин** // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: сб. материалов Международных академических чтений. – Курск: Изд-во КГУ, 2023. – С. 139-143.

18. **Амелин, П. А.** Анализ экспериментальных данных испытаний бетона и арматуры, работающих в условиях воздействия хлоридной агрессивной среды / С. В. Усанов, А. В. Калайдо, П. А. Амелин // Строительство. Архитектура. Дизайн: сб. материалов Пятой Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. – Курск: Университетская книга, 2024. – С. 200-208.

19. **Амелин, П. А.** Силовое сопротивление усиленного железобетона, работающего в агрессивных средах / В. И. Римшин, Л. А. Сулейманова, П. А. Амелин, Усанов С.В. // Железобетонные и каменные конструкции (ЖБК-2024): сб. тезисов докладов Международной научной конференции. – Казань: Изд-во КазГАСУ, 2024. – С. 52-53.

20. **Амелин, П. А.** Гальванический метод ускорения хлоридной коррозии железобетонных элементов / Л. А. Сулейманова, **П. А. Амелин** // Наука и инновации в строительстве: сб. докл. VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию со дня образования БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 134-141.

21. **Амелин, П. А.** Испытание однонаправленных тканых полос из углепластика / П. А. Амелин, Д. С. Аноприенко // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: сб. докл. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 3-8.

22. **Амелин, П. А.** Силовое сопротивление бетона, работающего в агрессивных средах / Римшин В.И., Л. А. Сулейманова, **П. А. Амелин**, Усанов С.В. // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: сб. материалов Международных академических чтений. – Курск: Изд-во КГУ, 2024. – С. 116-121.

Объекты интеллектуальной собственности

23. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664546.** Программа расчета внешнего композитного усиления железобетонных изгибаемых конструкций, подверженных равномерной коррозии стальной арматуры // Л.А. Сулейманова, В.И. Римшин,

П.А. Амелин, И.С. Рябчевский. Правообладатель: ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова». Оpubл. 01.08.2022.

24. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680168** Программа расчета внешнего композитного усиления железобетонных изгибаемых конструкций, подверженных различным видам коррозии поперечного сечения стальной арматуры // **П. А. Амелин, Л. А. Сулейманова, В. И. Римшин, С. М. Есипов, И. С. Рябчевский.** Правообладатель: ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова». Оpubл. 28.10.2022.

25. **Свидетельство о государственной регистрации Базы данных № 2025620166.** База данных нейросетевого прогнозирования прочности наклонных сечений железобетонных изгибаемых элементов, усиленных полимеркомпозитным армированием // В.И. Римшин, Л.А. Сулейманова, **П. А. Амелин.** Правообладатель: ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова». Оpubл. 13.01.2025.

АМЕЛИН ПАВЕЛ АНДРЕЕВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ КОРРОЗИОННО-ПОВРЕЖДЕННЫХ
ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ,
УСИЛЕННЫХ ВНЕШНИМ ПОЛИМЕРКОМПОЗИТНЫМ
АРМИРОВАНИЕМ**

Специальность 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.04.2025.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,725. Тираж 100 экз. Заказ №__.

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом
университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46