



УДК 69.07

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.3.28-40

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

## Несущая способность полимеркомпозитно усиленных изгибаемых железобетонных элементов в условиях воздействия коррозионной среды

В.И. Римшин<sup>1</sup>, Л.А. Сулейманова<sup>2</sup>, П.А. Амелин<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация

\* p.amelin@inbox.ru

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции, внешнее армирование, композитные материалы, углепластик, коррозионная среда, несущая способность, усиление балок, долговечность

### История статьи

Поступила в редакцию: 27.06.2025

Доработана: 02.07.2025

Принята к публикации: 04.07.2025

### Для цитирования

Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А. Несущая способность полимеркомпозитно усиленных изгибаемых железобетонных элементов в условиях воздействия коррозионной среды // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 11. № 3. С. 28–40.

**Аннотация.** Проблема обеспечения долговечности железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, остается чрезвычайно актуальной. Коррозия арматуры, вызванная воздействием хлоридов, приводит к значительному снижению несущей способности и требует дорогостоящего ремонта. Перспективной альтернативой традиционным методам усиления стальными элементами является применение композитных материалов на основе углеродного волокна (CFRP), обладающих высокой прочностью и коррозионной стойкостью. Однако их долговечность в условиях длительного воздействия агрессивных сред изучена недостаточно. Целью данного исследования являлась экспериментальная оценка эффективности усиления изгибаемых железобетонных элементов углепластиком и влияния на них хлоридсодержащей среды. Методика включала испытания серий балок с различной схемой армирования: без усиления, усиленные до коррозии и усиленные после предварительного коррозионного воздействия. Для ускоренной коррозии применялся электрохимический метод. Результаты подтвердили, что коррозия арматуры снижает несущую способность балок на 50–60 %. Усиление CFRP позволило повысить ее на 52 %, изменив характер разрушения с нормального на наклонное сечение. Ключевым выводом является то, что внешнее композитное армирование эффективно защищает конструкцию, однако повторная коррозия усиленного элемента вызывает рост внутренних напряжений и образование трещин в бетоне из-за накопления продуктов коррозии. Исследование подчеркивает необходимость учета этих факторов для обеспечения долговечности усиленных конструкций.

**Владимир Иванович Римшин**, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 9629-5322, Scopus: 56258934600, ORCID: 0000-0002-9084-4105, E-mail: v.rimshin@niisf.ru

**Людмила Александровна Сулейманова**, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; eLIBRARY SPIN-код: 7156-3920, Scopus: 55876997500, ResearcherID: I-3971-2018, ORCID: 0000-0002-1180-558X, E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

**Павел Андреевич Амелин**, кандидат технических наук, старший преподаватель, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46; eLIBRARY SPIN-код: 8237-9002, Scopus: 57212551021, ORCID: 0000-0002-7104-3214, E-mail: p.amelin@inbox.ru

© Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

# Bearing Capacity of Polymer-Composite Strengthened Bent Reinforced Concrete Elements under Conditions of Exposure to a Corrosive Environment

Vladimir I. Rimshin<sup>1</sup>, Lyudmila A. Suleymanova<sup>2</sup>, Pavel A. Amelin<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

\* p.amelin@inbox.ru

**Keywords:** reinforced concrete structures, external reinforcement, composite materials, carbon fiber, corrosive environment, load-bearing capacity, reinforcement of beams, durability

## Article history

Received: 30.05.2025

Revised: 05.06.2025

Accepted: 07.06.2025

## For citation

Rimshin V.I., Suleymanova L.A., Amelin P.A. Bearing Capacity of Polymer-Composite Strengthened Bent Reinforced Concrete Elements under Conditions of Exposure to a Corrosive Environment. *Reinforced concrete structures*. 2025; 3(11):28-40.

**Abstract.** The problem of ensuring the durability of reinforced concrete structures operating in aggressive environments remains extremely relevant. Corrosion of the reinforcement caused by exposure to chlorides leads to a significant decrease in load-bearing capacity and requires expensive repairs. A promising alternative to traditional methods of reinforcement with steel elements is the use of carbon fiber-based composite materials (CFRP), which have high strength and corrosion resistance. However, their durability under long-term exposure to aggressive environments has not been sufficiently studied. The purpose of this study was to experimentally evaluate the effectiveness of reinforcing bent reinforced concrete elements with carbon fiber and the effect of a chloride-containing environment on them. The methodology included testing a series of beams with different reinforcement schemes: without reinforcement, reinforced before corrosion, and reinforced after preliminary corrosion. An electrochemical method was used to accelerate corrosion. The results confirmed that rebar corrosion reduces the bearing capacity of the blocks by 50–60 %. The CFRP enhancement allowed it to be increased by 52 %, changing the nature of the fracture from a normal to an inclined section. The key conclusion is that the external composite reinforcement effectively protects the structure, however, repeated corrosion of the reinforced element causes an increase in internal stresses and the formation of cracks in concrete due to the accumulation of corrosion products. The study highlights the need to take these factors into account to ensure the durability of reinforced structures.

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения долговечности и несущей способности железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, является одной из наиболее актуальных задач современного строительства. По оценкам специалистов, ежегодные затраты на восстановление и ремонт железобетонных конструкций, поврежденных коррозией, составляют 0,3–1,3 % на объектах длительного срока службы [1–3].

Коррозионное воздействие хлоридсодержащих сред приводит к деградации арматуры и бетона, снижению прочностных и деформативных характеристик конструкций. Теоретическим и экспериментальным исследованиям изгибаемых железобетонных элементов при совместном действии эксплуатационных и средовых нагрузок посвящены работы В.М. Бондаренко, В.И. Римшина, А.Г. Тамразяна, В.И. Колчунова, И.Г. Овчинникова, Г.А. Смоляго, В.П. Селяева, С.Н. Леоновича и др. [4–12].

*Vladimir I. Rimshin*, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9629-5322, Scopus: 56258934600, ORCID: 0000-0002-9084-4105, E-mail: v.rimshin@niisf.ru

*Lyudmila A. Suleymanova*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7156-3920, Scopus: 55876997500, ResearcherID: I-3971-2018, ORCID: 0000-0002-1180-558X, E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru

*Pavel A. Amelin*, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46 Kostyukova St., Belgorod, 308012, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8237-9002, Scopus: 57212551021, ORCID: 0000-0002-7104-3214, E-mail: p.amelin@inbox.ru

Традиционные методы усиления железобетонных конструкций с использованием стальных элементов имеют существенные ограничения, связанные с подверженностью коррозии, большой массой и сложностью монтажа [13–16]. В последние десятилетия активно развивается технология усиления с применением полимеркомпозитных материалов на основе углеродных волокон (CFRP — Carbon Fiber Reinforced Polymer), которые обладают высокой прочностью, малым весом и коррозионной стойкостью [17, 18].

Многочисленные исследования подтверждают высокую эффективность применения полимеркомпозитного усиления изгибаемых железобетонных элементов. Вопросы полимеркомпозитного усиления железобетонных конструкций изучены в работах В.И. Римшина, Д.Р. Маиляна, В.И. Морозова, С.И. Меркулова, Toutanji, Chotickai и др. Исследования показали, что внешнее армирование углепластиком позволяет повысить несущую способность балок на 50–150 % в зависимости от схемы усиления и процента армирования [19–22]. Композитные материалы сохраняют свою эффективность при длительной эксплуатации в нормальных условиях [22–26].

Однако вопрос долговечности систем усиления CFRP в агрессивных средах остается недостаточно изученным. Некоторые исследования указывают на возможную деградацию композитных материалов и контактной зоны бетон-композит при воздействии хлоридов, повышенной температуры и влажности. Работы Al-Osta [27] показали, что коррозионная среда может снижать эффективность CFRP-усиления корродированных балок. Исследования Ofoegbu [28] выявили электрохимическую активность CFRP в хлоридсодержащих растворах, что может влиять на долговечность системы. Большинство исследований фокусируется на усилении уже корродированных конструкций, в то время как поведение CFRP-систем, установленных на неповрежденные элементы и затем подвергнутых воздействию агрессивной среды, изучено недостаточно.

Целью исследования является оценка эффективности усиления изгибаемых железобетонных элементов композитными материалами на основе углеродного волокна и исследование влияния хлоридсодержащей среды на несущую способность усиленных конструкций.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- провести экспериментальные исследования несущей способности железобетонных изгибаемых элементов;
- провести анализ изменения несущей способности сечения после коррозионного повреждения и полимеркомпозитного усиления;
- провести анализ влияния повторного воздействия агрессивной среды на усиленную конструкцию.

## МЕТОД

Для реализации поставленных задач была разработана программа испытаний, включающая оценку объема и числа тестируемых образцов, их размеров и механических характеристик, а также подготовку необходимого оборудования, инструментов и измерительных устройств. Были изготовлены как основные, так и вспомогательные опытные образцы. Экспериментальные исследования охватывали следующие виды испытаний:

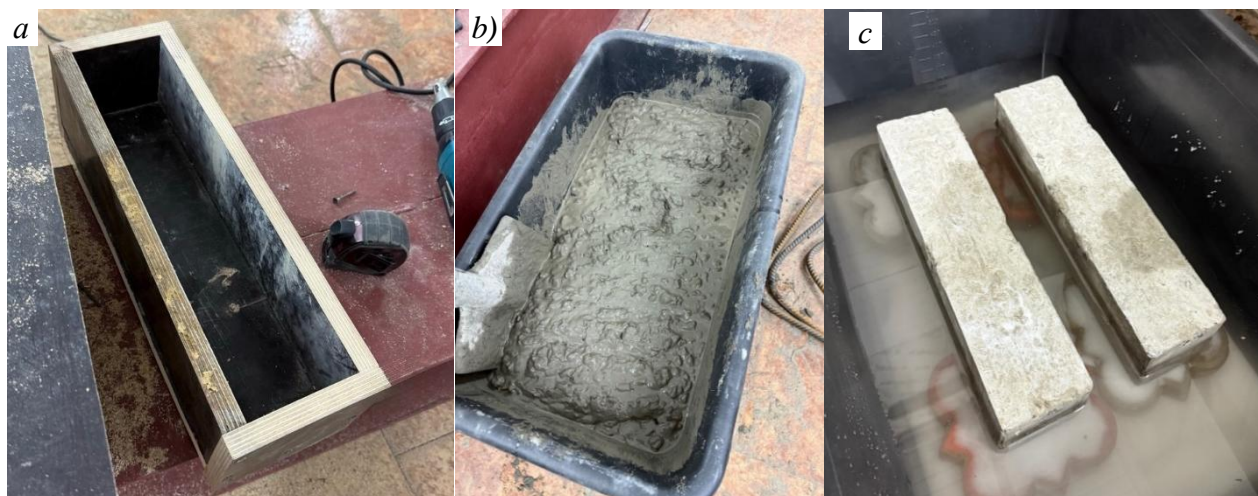
- испытания для определения механических свойств используемых материалов;
- продолжительные испытания образцов в условиях воздействия агрессивной среды;
- усиление и испытание усиленной композитными материалами конструкции.

В рамках реализации исследовательских задач сформирована экспериментальная программа, предусматривающая проведение испытаний трех серий элементов и образцов, в том числе следующих типов испытаний:

- испытание балок класса В25 и размером  $100 \times 100 \times 400$  на прочность, сжатие, изгиб, определение начального модуля упругости в количестве 3 шт. на серию;

- испытание вспомогательных образцов в виде полос ламелей в количестве 3 шт. на серию;
- испытание вспомогательных образцов в виде арматуры в количестве 3 шт. на серию;
- испытание железобетонных призм балок с арматурой диаметром 12 мм, поврежденной в результате коррозии в количестве 3 шт. на серию;
- испытание усиленных железобетонных призм балок с арматурой диаметром 12 мм, поврежденной в результате коррозии в количестве 3 шт. на серию;
- испытание повторно подвергшихся воздействию агрессивной среды усиленных железобетонных призм балок с арматурой диаметром 12 мм, поврежденной в результате коррозии в количестве 3 шт. на серию.

Опытные образцы представляли собой железобетонные балки прямоугольного сечения, выполненные в деревянной опалубке, размером  $100 \times 100 \times 400$  мм (рис. 1, *a*). Бетон класса В25 изготавливался из портландцемента марки ПЦ 500 III-42,5, мелкозернистого заполнителя с модулем крупности 1,25 и крупного заполнителя фракции 5–20 мм с плотностью зерен  $1650 \text{ кг/м}^3$  (рис. 1, *b*). Состав бетонной смеси на  $1 \text{ м}^3$ : портландцемент ПЦ 500 III-42,5 — 346 кг; песок — 612 кг; щебень — 1330 кг; вода — 160 л. После набора прочности образцы без арматуры были помещены в 6%-ный раствор NaCl для воздействия на них агрессивной среды. На протяжении 336 ч находились в 50-литровых ваннах с солью.



**Рис. 1.** Процесс изготовления экспериментальных образцов: *a* — опалубка; *b* — бетонная смесь; *c* — насыщение образцов солевым раствором

**Fig. 1.** The process of manufacturing experimental samples: *a* — formwork; *b* — concrete mixture; *c* — saturation of samples with saline solution

Для оценки прочностных характеристик бетонных призм в исходном состоянии были проведены всесторонние испытания на сжатие и изгиб в соответствии с ГОСТ 10180–2012, а также для определения начального модуля упругости согласно ГОСТ 24452–80. Испытания на осевое сжатие (рис. 2, *a*) проводились на гидравлическом прессовом оборудовании WEW-600D с управлением нагрузкой и фиксацией результатов в режиме реального времени. Продольные деформации бетона фиксировались с использованием индикаторов часового типа МИГ-1 с делением шкалы 0,001 мм. Бетонную призму на растяжение с изгибом испытывали на прессе гидравлическом ПГМ-1000МГ4 (рис. 2, *b*). Стенд для испытания на изгиб оснащен двумя опорами, которые фиксируют бетонную призму на его концах.

Армирование балок выполнялось стержнями класса А500С диаметром 12 мм. Было реализовано три схемы армирования: с одним, двумя и тремя стержнями в растянутой зоне для создания различных уровней несущей способности базовых образцов.

Внешнее армирование осуществлялось с использованием углеродной ткани SikaWrap-230C толщиной 0,23 мм, приклеиваемой на эпоксидную смолу Fibarm Resin 530+. Прочность углеродного волокна — 3450,7 МПа, модуль упругости при растяжении — 192,88 ГПа, относительное удлинение — 1,87 %. В результате были построены диаграммы деформирования бетона и арматуры (рис. 3).

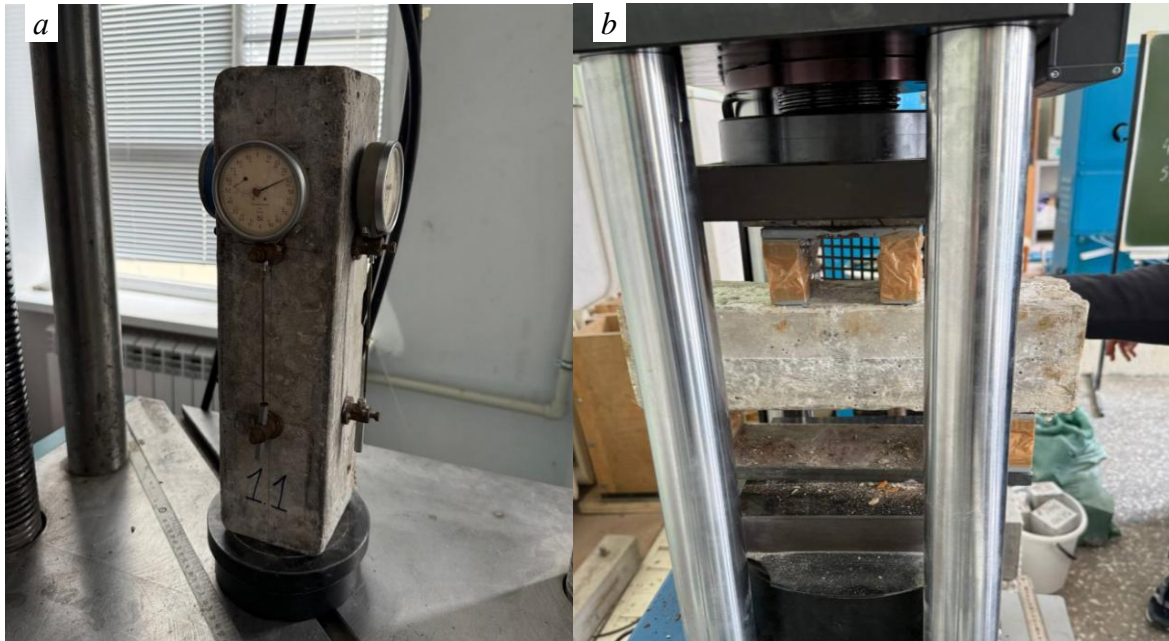


Рис. 2. Испытание вспомогательных экспериментальных образцов:  
*a* — на сжатие; *b* — на изгиб при растяжении

Fig. 2. Testing of auxiliary experimental samples: *a* — for compression; *b* — for bending under tension

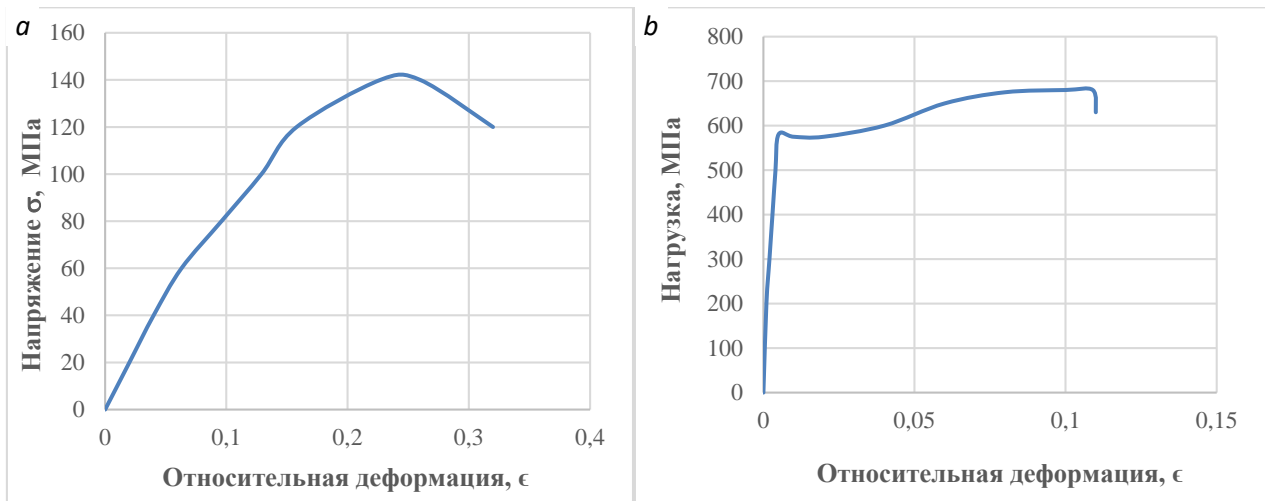


Рис. 3. Опытные диаграммы деформирования образцов: *a* — бетона; *b* — стальной арматуры  
 Fig. 3. Experimental diagrams of deformation of samples: *a* — concrete; *b* — steel reinforcement

В соответствии с планом эксперимента было подготовлено три серии образцов: балки первой серии Б1.1., Б1.2., Б1.3. были подвержены действию агрессивной среды, но не были усилены; балки второй серии Б2.1., Б2.2., Б2.3. были подвержены действию агрессивной среды и были усилены; балки третьей серии Б3.1., Б3.2., Б3.3. были подвержены действию агрессивной среды дважды — до усиления и после усиления.

После набора прочности образцы с арматурой были подготовлены к искусственному коррозионному воздействию. Для ускоренного воздействия агрессивной среды использовался электрохимический метод стимуляции коррозии. Использовался лабораторный блок питания 2А 15В YA XUN 1502DD в количестве 3 штук. Балки частично погружались в 6%-ный раствор NaCl, чтобы обеспечить доступ агрессивной среды к арматуре. Электроды подключались: арматура образца — как анод, внешний инертный электрод — как катод. Постоянный ток (порядка 2 мА/см<sup>2</sup>) подавался от источника питания на протяжении 336 ч (рис. 4).



**Рис. 4.** Процесс электрохимического метода стимуляции коррозии в элементах  
**Fig. 4.** The process of the electrochemical method of stimulating corrosion in the elements

После процесса коррозии диаметр арматуры от изначальных 12 мм составил:

- у образцов первой серии 1,1–5 мм;
- у образцов второй серии 2,1–6,8 мм;
- у образцов третьей серии 3,1–7 мм.

Усиление железобетонных образцов композитными материалами выполнялось поэтапно:

- подготовка поверхности. Растянутую часть образца шлифовали, очищали и обезжиривали для обеспечения сцепления клея с бетоном. Поверхность должна быть прочной (не менее 15 МПа), сухой (влажность  $\leq 4\%$ ) и выдержанной не менее 7 сут;
- разметка зоны наклейки. На очищенную поверхность наносили разметку для точного расположения ламелей длиной 300 мм по центру растянутой зоны;
- приготовление и нанесение клея. Использовали двухкомпонентный эпоксидный состав FibArm Resin 30+ (А:Б=100:50), смешиваемый при 15–25°C в течение 3 мин. Клей наносили в два слоя — грунтовочный и основной;

- укладка лент. Композитные ламели устанавливали вручную по разметке и прокатывали металлическим валиком для удаления пузырьков и обеспечения плотного прилегания.

Испытания балок на изгиб проводились по двухточечной схеме нагружения с пролетом 300 мм согласно ГОСТ 10180–2012. Нагрузка прикладывалась концентрированным усилием в середине пролета (двухточечное нагружение с равномерным распределением нагрузки), что создавало изгибающий момент, аналогичный рабочим условиям балки в конструкции. Для контроля деформаций на балках устанавливали тензодатчики, позволяющие фиксировать поведение конструкции на всех этапах нагружения. Нагрузка увеличивалась ступенчато с постоянным контролем прогибов и появлением трещин. В процессе испытаний регистрировались:

- момент образования и развития трещин;
- характер и разрушающая нагрузка;
- деформации бетона и композитного материала с использованием тензометрических датчиков.

Несущая способность балок определялась по формуле:

$$M = \frac{P \cdot l}{6}, \quad (1)$$

где  $P$  — разрушающая нагрузка, кН;  $l$  — пролет балки, мм.

Эффективность усиления оценивалась коэффициентом увеличения несущей способности:

$$k = \frac{M_{\text{усил}}}{M_{\text{контр}}}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{усил}}$  — несущая способность усиленного образца, кН·м;  $M_{\text{контр}}$  — несущая способность контрольного образца без усиления, кН·м.

Степень деградации системы усиления в коррозионной среде определялась коэффициентом снижения эффективности:

$$k_{\text{degr}} = \frac{M_{\text{норм}} - M_{\text{корр}}}{M_{\text{норм}}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $M_{\text{норм}}$  — несущая способность усиленного образца в нормальных условиях, кН·м;  $M_{\text{корр}}$  — несущая способность усиленного образца после воздействия коррозионной среды, кН·м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Контрольные образцы изгибаемых элементов серии 1 (без усиления с повреждениями арматуры в растянутой зоне) в ходе испытания были доведены до разрушения. Характер разрушения всех балок серии был схож: разрушение произошло по нормальному сечению в результате достижения арматурой растянутой зоны временного предела сопротивления арматуры в середине пролета при нагрузке, составляющей в среднем 11,62 кН (рис. 5).

На рисунке видно, что в результате воздействия агрессивной среды диаметр арматуры изменился. В середине пролета коррозия оказала самое сильное влияние. Из-за локального расширения коррозионного слоя на поверхности арматуры происходит ухудшение сцепления между арматурой и бетоном, что снижает прочность балки. Такие процессы способствуют образованию трещин в бетоне и ускоряют разрушение при приложении нагрузки.



**Рис. 5.** Испытание и разрушение образцов Б.1  
**Fig. 5.** Testing and destruction of samples B.1

Разрушение образцов серии 2 (рис. 6) произошло при средней нагрузке 17,42 кН, по наклонному сечению у опоры, вне композитного усиления, что показывает, что прочность усиления и прочность слоя холст – бетон в полной мере обеспечивает прочностные характеристики поврежденной коррозией железобетонной конструкции. Это свидетельствует, что усиление эффективно перераспределяет усилия, предотвращая разрушение в месте усиления растянутой зоны, и значительно улучшает долговечность элемента. Кроме того, повреждения, возникающие в зоне без усиления, подчеркивают важность правильного применения различных эффективных конструктивных решений.



**Рис. 6.** Испытание и разрушение образцов Б.2  
**Fig. 6.** Testing and destruction of samples B.2

В ходе испытания образцов 3 серии, после процесса повторного коррождения было установлено, что, несмотря на сохранение целостности адгезионного соединения между композитным усилением и поверхностью бетона (отслоения ленты не выявлено), в теле железобетонного элемента произошло развитие внутренних напряжений, вызванных накоплением продуктов коррозии в зоне контакта арматуры с бетоном. Данные напряжения способствовали возникновению продольных трещин, что свидетельствует о локальном разрушении материала под действием коррозионных процессов (рис. 7). Образцы разрушались при средней нагрузке 12,62 кН, сопоставимой с образцами 1 серии.



**Рис. 7.** Испытание и разрушение образцов Б.3  
**Fig. 7.** Testing and destruction of samples B.3

В результате воздействия агрессивной среды на арматуру в теле бетона остаточной прочности не хватило для поддержания должных физико-механических характеристик железобетонных балок (табл.).

Результаты испытаний железобетонных образцов на изгиб

Маркировка балок	Разрушающая нагрузка $P$ , кН	Средняя разрушающая нагрузка $P_{cp}$ , кН
Б1.1.	11,65	11,62
Б1.2.	11,2	
Б1.3.	12,01	
Б2.1.	17,56	17,42
Б2.2.	17,52	
Б2.3.	17,2	
Б3.1.	12,56	12,62
Б3.2.	12,69	
Б3.3.	12,63	

Results of bending tests of reinforced concrete samples

Marking of beams	Destructive load $P$ , kN	Average destructive load $P_{ave}$ , kN
Б1.1.	11,65	11,62
Б1.2.	11,2	
Б1.3.	12,01	
Б2.1.	17,56	17,42
Б2.2.	17,52	
Б2.3.	17,2	
Б3.1.	12,56	12,62
Б3.2.	12,69	
Б3.3.	12,63	

Полученные результаты указывают на сложный характер взаимодействия между коррозионными повреждениями и механическим поведением усиленных конструкций. В частности,

несмотря на эффективность внешнего композитного усиления в предотвращении механического разрушения адгезионного слоя, коррозионные процессы, протекающие в глубине элемента, продолжают формировать критические напряжения, способные приводить к внутренним повреждениям бетона и последующему снижению несущей способности конструкции.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные данные подтвердили, что коррозия арматуры в растянутой зоне приводит к значительному снижению несущей способности железобетонных балок. Разрушение корродированных балок (серия 1) происходило по нормальному сечению вследствие достижения предела текучести ослабленной арматуры. Это свидетельствует о смене механизма разрушения при коррозионном повреждении.

Характер разрушения усиленных образцов меняется с нормального на наклонное сечение. Разрушение усиленных прокорродированных образцов по наклонному сечению показывает, что усиление углеродными волокнами значительно повышает несущую способность балки. Образцы серии 2 показали повышение прочностных характеристик на 52 % по отношению к серии 1.

Балки 3 серии оказались полностью защищены от воздействия агрессивной среды в месте усиления. Однако при повторном коррозионном воздействии на усиленные композитами балки наблюдается локальное увеличение внутренних напряжений в теле бетона. Это связано с продуктами повторной коррозии, которые не могут выйти из тела бетона, из-за чего появляются продольные трещины в образце. Однако прочность слоя композит – бетон не меняется.

Таким образом, исследование подтвердило, что коррозия арматуры в растянутой зоне критически снижает прочность балок, а повторная коррозия усиленных конструкций вызывает рост внутренних напряжений, что требует учета при проектировании усиления.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Coppola L., Kara P., Lorenzi S. The Improvement of Durability of Reinforced Concretes for Sustainable Structures : a Review on Different Approaches // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 8. P. 4028. DOI: 10.3390/app12084028
2. Building Research Establishment. Corrosion of Steel in Concrete. BRE Digest 444. Watford : BRE, 2000. 8 p.
3. Local Surveyors Direct. Durability of Reinforced Concrete. Part 1 // Technical Report. 2007. URL: <https://www.localsurveyorsdirect.co.uk/durability-reinforced-concrete-part-1>
4. Бондаренко В.М. Феноменология кинетики повреждений бетона железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивной среде // Бетон и железобетон. 2008. № 2. С. 25–27.
5. Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А. Прочность нормальных и наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов, поврежденных коррозией и усиленных внешним композитным армированием // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2025. № 1. С. 117–127. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-117-127. EDN SUOQOD.
6. Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А., Аноприенко Д.С. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов в хлоридной агрессивной среде // Строительная механика и конструкции. 2025. № 1 (44). С. 40–51. DOI: 10.36622/2219-1038.2025.44.1.004. EDN PUFJJA.

7. *Колчунов В.И., Губанова М.С.* Напряженно-деформированное состояние нагруженного и коррозионно-поврежденного железобетона в зоне наклонных трещин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2016. № 2 (42). С. 11–22. EDN WAESTL.
8. *Tamrazyan A.G., Lushnikova V.Y.* The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 4 (80). Pp. 128–137. DOI 10.18720/MCE.80.12. EDN XYLDVB.
9. *Смоляго Г.А., Фролов Н.В.* Современные подходы к расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями // Вестник ТГАСУ. 2019. № 6. С. 88–100.
10. *Овчинников И.И., Тао Чэнь, Овчинников И.Г.* Вероятностное моделирование поведения армированных мостовых конструкций в агрессивных условиях эксплуатации // Транспортные сооружения : интернет-журнал. 2017. Т. 4. № 4.
11. *Селяев В.П., Селяев П.В., Алимов М.Ф., Сорокин Е.В.* Оценка остаточного ресурса железобетонных изгибаемых элементов, подверженных действию хлоридной коррозии // Строительство и реконструкция. 2017. № 6 (74). С. 49–58.
12. *Леонович С.Н., Степанова А.В.* Деформирование и разрушение железобетонных конструкций: моделирование в условиях хлоридной коррозии // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2012. № 1 (24). С. 81–83.
13. *Римшин В.И., Варламова А.А.* Модели поведения бетона. Общая теория деградации : монография. 2-е изд., доп. М. : ИНФРА-М, 2023. 439 с. DOI: 10.12737/1853676
14. *Antoshkin V.D., Erofeev V.T., Travush V.I. et al.* The problem optimization triangular geometric line field // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9. No. 3. Pp. 46–50. DOI: 10.5539/mas.v9n3p46
15. *Клевцов В.А., Коровин Н.Н.* Разработка, исследование, диагностика и усиление железобетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1997. № 5. С. 21–22.
16. *Меркулов С.И., Татаренков А.И., Стародубцев В.Г.* Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 4 (992). С. 41–43.
17. *Шилин А.А., Пшеничный В.А., Карпузов Д.В.* Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. М. : Стройиздат, 2004. 144 с.
18. *Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З.* Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство. 2003. № 3. С. 15–16.
19. *Римшин В.И., Меркулов С.И., Есипов С.М.* Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 2 (35). С. 93–100. DOI: 10.5281/zenodo.1286034
20. *Георгиев С.В., Польской П.П., Маилян Д.Р.* Особенности работы под нагрузкой сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами. Ростов н/Д : Донской государственный технический университет, 2021. 114 с.
21. *Римшин В.И., Меркулов С.И.* К вопросу усиления железобетонных конструкций внешним армированием композитным материалом // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 5. С. 92–100.
22. *Бондаренко В.М., Римшин В.И.* Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. М. : Студент, 2015. 110 с.
23. *Маилян Д.Р., Польской П.П., Мухоб А.* Вопросы исследования прочности нормальных сечений балок, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. С. 99.
24. *Toutanji HA.* Durability characteristics of concrete beams externally bonded with FRP composite sheets // Cement and Concrete Composites. 1997. Vol. 19. No. 4. Pp. 351–358. DOI: 10.1016/S0958-9465(97)00028-0
25. *Chotickai P., Bowman M.D.* Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Composite in Corrosive Environment // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 250–253. Pp. 3706–3714. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.3706
26. *Fazli H., Yassin A.Y.M., Shafiq N., Teo W.* The Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Strengthened Beams Under a Marine Environment // Geomaterials. 2017. Vol. 7. No. 4. Pp. 52–58.
27. *Al-Osta M.A., Kharma K.M., Ahmad S., Maslehuddin M., Al-Huri M., Khalid H.M.* Strategies for strengthening of corroded reinforced concrete beams using CFRP laminates and UHPC jacketing // Structural Concrete. 2023. Vol. 24. No. 1. Pp. 612–636. DOI: 10.1002/suco.202200211
28. *Ofoegbu S.U., Ferreira M.G.S., Zheludkevich M.L.* Electrochemical characterization and degradation of carbon fiber reinforced polymer in simulated marine environments // Materials Degradation. 2022. Vol. 6. No. 39. DOI: 10.1038/s41529-022-00261-1

## REFERENCES

1. Coppola L., Kara P., Lorenzi S. Improving the durability of reinforced concrete structures to create stable structures : an overview of various approaches. *Applied Sciences*. 2022; 12(8):4028. DOI: 10.3390/app12084028
2. Scientific Research Institute of Construction. Corrosion of steel in concrete. BRE Digest 444. Watford, BRE, 2000; 8.
3. Local surveyors' guide. Durability of reinforced concrete. Part 1. *Technical report*. 2007. URL: [https://www.localsurveyorsdirect.co.uk/durability-reinforced-concrete-part-](https://www.localsurveyorsdirect.co.uk/durability-reinforced-concrete-part-1)
4. Bondarenko V.M. Phenomenology of kinetics of concrete damage to reinforced concrete structures operating in an aggressive environment. *Concrete and reinforced concrete*. 2008; 2:25-27. (in Russian).
5. Rimshin V.I., Suleymanova L.A., Amelin P.A. Strength of normal and inclined sections of bent reinforced concrete elements damaged by corrosion and reinforced with external composite reinforcement. *Bulletin of Belgorod State Technological University V.G. Shukhov*. 2025; 1:117-127. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-1-117-127. EDN CODE. (in Russian).
6. Rimshin V.I., Suleymanova L.A., Amelin P.A., Anoprienko D.S. Finite element modeling of the stress-strain state of bent ferrous elements in a chloride aggressive environment. *Construction mechanics and structures*. 2025; 1(44):40-51. DOI: 10.36622/2219-1038.2025.44.1.004. EDN PUFRIA. (in Russian).
7. Kolchunov V.I., Gubanova M.S. Stress-strain state of loaded and corrosively damaged reinforced concrete in the area of inclined cracks. *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture*. 2016; 2(42):11-22. (in Russian).
8. Tamrazyan A.G., Lushnikova V.Y. The effect of rebar corrosion on rebar adhesion to concrete. *Magazine of civil engineering*. 2018; 4(80):128-137. DOI: 10.18720/MCE.80.12. EDN XYLDVB.
9. Smolyago G.A., Frolov N.V. Modern approaches to calculating the residual resource of bent reinforced concrete elements with corrosion damage. *Bulletin of TSASU*. 2019; 6:88-100. (in Russian).
10. Ovchinnikov I.I., Tao Chen, Ovchinnikov I.G. Probabilistic modeling of reinforced bridge structures behavior in aggressive operating conditions. *Transport facilities : Online magazine*. 2017; 4(4). (in Russian).
11. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Alimov M.F., Sorokin E.V. Assessment of the residual resource of reinforced concrete bendable elements exposed to chloride corrosion. *Building and reconstruction*. 2017; 6(74):49-58. (in Russian).
12. Leonovich S.N., Stepanova AV. Deformation and destruction of reinforced concrete structures: Modeling under conditions of chloride corrosion. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2012; 1(24):81-83. (in Russian).
13. Rimshin V.I., Varlamov A.A. Models of concrete behavior. The general theory of degradation : a monograph. 2nd ed., supplement. Moscow, INFRA-M, 2023; 439. DOI: 10.12737/1853676 (in Russian).
14. Antoshkin V.D., Erofeev V.T., Travush V.I. et al. The problem optimization triangular geometric line field. *Modern Applied Science*. 2015; 9(3):46-50. DOI: 10.5539/mas.v9n3p46
15. Klevtsov V.A., Korovin N.N. Development, research, diagnostics and reinforcement of reinforced concrete structures. *Concrete and reinforced concrete*. 1997; 5:21-22. (in Russian).
16. Merkulov S.I., Tatarenkov A.I., Starodubtsev V.G. Reinforcement of reinforced concrete structures of operated buildings and structures. *BST: Bulletin of Construction Machinery*. 2017; 4(992):41-43. (in Russian).
17. Shilin A.A., Pshenichny V.A., Kartuzov D.V. *Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials*. Moscow, Stroyizdat, 2004; 144. (in Russian).
18. Chernyavsky V.L., Axelrod E.Z. Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. *Housing construction*. 2003; 3:15-16. (in Russian).
19. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Concrete structures reinforced with composite material. *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2018; 2(35):93-100. DOI: 10.5281/zenodo.1286034 (in Russian).
20. Georgiev S.V., Polskoy P.P., Mailyan D.R. *Features of work under load of compressed reinforced concrete elements reinforced with composite materials*. Rostov-on-Don, Don State Technical University, 2021; 114. (in Russian).
21. Rimshin V.I., Merkulov S.I. On the issue of reinforcement of reinforced concrete structures by external reinforcement with composite material. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018; 20(5):92-100. (in Russian).
22. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. *Dissipative theory of force resistance of reinforced concrete*. Moscow, Student, 2015; 110. (in Russian).
23. Mailyan D.R., Polskoy P.P., Mikhub A. Issues of studying the strength of normal cross-sections of beams reinforced with various types of composite materials. *Engineering Bulletin of Don*. 2013; 2:99. (in Russian).
24. Tutanji H.A. Durability characteristics of concrete beams bonded externally with FRP composite sheets. *Cement and concrete composites*. 1997; 19(4):351-358. DOI: 10.1016/S0958-9465(97)00028-0

25. Chotikai P., Bowman M.D. Operational characteristics of reinforced concrete beams reinforced with carbon fiber composite in an aggressive environment. *Advanced Materials Research*. 2011; 250-253:3706-3714. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.3706
26. Fazli H., Yasin A.Y., Shafiq N., Theo U. Behavior of beams made of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in the marine environment. *Geomaterials*. 2017; 7(4):52-58.
27. Al-Osta M.A., Harma K.M., Ahmad S., Maslehuddin M., Al-Khoury M., Khalid H.M. Strategies for strengthening rusted reinforced concrete beams using carbon fiber plates and UHPC shells. *Structural concrete*. 2023; 24(1):612-636. DOI: 10.1002/suco.202200211
28. Ofoegbu S.U., Ferreira M.G.S., Zheludkevich M.L. Electrochemical characterization and degradation of carbon fiber reinforced polymer under simulated marine conditions. *Degradation of materials NPJ*. 2022; 6(39). DOI: 10.1038/s41529-022-00261-1