



СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES, BUILDINGS AND STRUCTURES

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРОЗИИ В ПРЕДНАПРЯЖЕННОМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОМ ИЗГИБАЕМОМ ЭЛЕМЕНТЕ

Научная статья

Андреев И.Ф.^{1,*}

¹ORCID : 0000-0001-9339-8078;

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (yfyfyt[at]gmail.com)

Аннотация

Коррозия арматуры является одним из ключевых факторов, снижающих долговечность и несущую способность предварительно напряженных железобетонных конструкций, особенно работающих в агрессивных средах. В статье рассмотрены вопросы разработки и верификации достоверных численных моделей для оценки остаточного ресурса коррозионно-поврежденных предварительно напряженных конструкций является актуальной задачей, позволяющей перейти от качественных оценок к прогнозированию их поведения и обоснованию ремонтных мероприятий.

В работе выполнено конечно-элементное моделирование в программном комплексе ANSYS. Для описания поведения бетона использована конститутивная модель Menetrey-Willam, для арматуры — билинейная диаграмма с упрочнением. Проведена верификация моделей на экспериментальных данных для балок с различной степенью коррозионного повреждения арматуры и соответствующими потерями предварительного напряжения. На основе верифицированной методики выполнен анализ полноразмерной подкрановой балки таврового сечения.

Установлена сходимость (85–90%) результатов численного моделирования с экспериментальными данными, что подтверждает корректность выбранных моделей материалов, типов конечных элементов и граничных условий. Показано, что коррозионные повреждения и сопутствующая потеря предварительного напряжения приводят к значительному снижению несущей способности изгибаемых элементов. Для коррозионно-поврежденных балок с высоким процентом потерь (60%) и для балок без предварительного напряжения характер разрушения меняется: предельное состояние достигается не при достижении текучести арматуры, а вследствие хрупкого разрушения бетона.

Полученные результаты позволяют проводить достоверную оценку влияния коррозии на напряженно-деформированное состояние и несущую способность реальных предварительно напряженных конструкций, что необходимо для прогнозирования их остаточного ресурса и разработки стратегий обслуживания и усиления.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, коррозия, преднатяжение, арматурные канаты, численное моделирование.

NUMERICAL SIMULATION OF CORROSION IN A PRESTRESSED REINFORCED CONCRETE FLEXIBLE ELEMENT

Research article

Andreev I.F.^{1,*}

¹ORCID : 0000-0001-9339-8078;

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (yfyfyt[at]gmail.com)

Abstract

Corrosion of rebars is one of the key factors reducing the durability and load-bearing capacity of prestressed reinforced concrete structures, especially those operating in aggressive environments. The article examines the issues of developing and verifying reliable numerical models for assessing the residual life of corrosion-damaged prestressed constructions, which is a pressing task that allows us to move from qualitative assessments to predicting their behavior and justifying repair measures.

The work was carried out using finite element modeling in the ANSYS software package. The Menetrey-Willam constitutive model was used to describe the behavior of concrete, and a bilinear diagram with hardening was used for reinforcement. The models were verified using experimental data for beams with varying degrees of corrosion damage to the rebars and corresponding losses of prestressing force. Based on the verified methodology, an analysis of a full-size T-section crane rail was performed.

The convergence (85–90%) of numerical simulation results with experimental data has been established, confirming the correctness of the selected material models, finite element types, and boundary conditions. It was shown that corrosion damage and the associated loss of prestressing lead to a significant reduction in the load-bearing capacity of flexible elements. For corrosion-damaged beams with a high percentage of loss (60%) and for beams without prestressing, the nature of the failure changes: the limit state is reached not when the reinforcement reaches yield, but as a result of brittle failure of the concrete.

The obtained results allow for a reliable evaluation of the effect of corrosion on the stress-strain state and load-bearing capacity of real prestressed constructions, which is necessary for predicting their residual service life and developing maintenance and reinforcement strategies.

Keywords: reinforced concrete structures, corrosion, prestressing, reinforcement cables, numerical modeling.

Введение

В данной статье приведены расчеты экспериментальных образцов изгибаемых железобетонных элементов в программном комплексе Ansys. Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки влияния коррозии арматуры на несущую способность предварительно напряженных железобетонных конструкций [1], особенно ответственных, таких как подкрановые балки. Коррозия приводит к уменьшению сечения арматуры и потере предварительного напряжения [3], что может вызвать перераспределение усилий и хрупкое разрушение. Эксплуатация предварительно напряженных железобетонных конструкций в условиях агрессивных сред, характерных для многих промышленных предприятий (химических, металлургических, целлюлозно-бумажных комбинатов), приводит к развитию коррозионных процессов в арматуре. Особую уязвимость демонстрируют ответственные изгибающие элементы, такие как подкрановые балки, работающие под воздействием значительных динамических и статических нагрузок. Коррозия напрягаемой арматуры является комплексной проблемой, приводящей не только к уменьшению площади поперечного сечения канатов, но и к потере предварительного напряжения, ухудшению сцепления с бетоном, а также к инициированию и развитию трещин в бетоне. Совокупность этих факторов существенно снижает несущую способность, жесткость и долговечность конструкций, создавая риски аварийных ситуаций и требуя значительных затрат на ремонт и усиление.

В качестве объекта экспериментального исследования были выбраны предварительно напряженные железобетонные балки прямоугольного сечения размерами 100×150 мм и длиной 1200 мм. Образцы армировались высокопрочными семипроволочными канатами классов K1400, которые подвергались предварительному натяжению с контролем усилий тензодатчиками. Особенностью методики являлось моделирование коррозионного повреждения на участке чистого изгиба. Для этого на этапе подготовки на канаты накладывались электроды с шагом 200 мм для проведения управляемой ускоренной электрохимической коррозии в 7% растворе хлорида натрия, позволяющей достичь целевых степеней повреждения 20% и 30% сечения.

Коррозионное повреждение в численном моделировании реализовывалось через поэтапное уменьшение площади поперечного сечения канатов и соответствующее снижение уровня предварительного напряжения. Учет ослабления сцепления на поврежденных участках в модели не задавалось, так как конструкция предполагает работу арматурного каната за счет закладных упорных элементов.

Актуальность проведения детальных экспериментальных и численных исследований в данной области обусловлена недостаточной изученностью количественного влияния различных степеней коррозионного повреждения на остаточный ресурс предварительно напряженных элементов. Существующие нормативные методы расчета, как правило, не предусматривают прямого учета снижения прочностных и деформационных характеристик материалов вследствие коррозии, что может приводить к неконсервативным оценкам несущей способности и запаса надежности эксплуатируемых конструкций.

Целью настоящего исследования являлось комплексное численное и экспериментальное изучение влияния коррозии преднапрягаемых арматурных канатов на прочностные и деформационные характеристики железобетонных балок при статическом и циклическом нагружении. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: разработка методики проведения ускоренной электрохимической коррозии образцов с заданными уровнями повреждения; экспериментальное определение изменения механических свойств арматурных канатов после коррозии; исследование несущей способности, деформативности (прогибов) и характера разрушения балок-образцов; анализ кинетики образования и раскрытия трещин; построение и верификация конечно-элементной модели, учитывающей уменьшение сечения арматуры, потерю преднапряжения и ослабление сцепления; установление количественных зависимостей между степенью коррозии, потерей предварительного напряжения и снижением нагрузочной способности элемента.

Методы и принципы исследования

Работа бетона описывалась с помощью модели Menetrey-Willam. Модель Menetrey-Willam, как правило, лучше подходит для моделирования поведения связанных заполнителей, таких как бетон, чем например модель Drucker-Prager [2], [4].

В качестве основы данная модель использует теорию пластического течения. Модель бетона состоит из трех основных компонентов:

1) Трехинвариантная предельная поверхность f_{MW} , описываемая уравнением:

$$f_{MW} = \frac{c_2}{c_3} \left[\sqrt{2\xi + rp} \right] + p^2 - \frac{1}{c_3}, \quad (1)$$

где, c_2 и c_3 параметры уравнения, контролирующие форму меридионального сечения поверхности и определяемые на основании пределов текучести при одноосном растяжении (R_t), сжатии (R_c) и двухосном сжатии (R_b) [5].

2) Поверхность пластического потенциала [6], отвечающая за направление вектора пластических деформаций

$$Q_{MW} = \rho^2 + B_g p + C_g \xi, \quad (2)$$

$$B_g = \frac{2 \cdot (\sqrt{2} \cdot \tan(\Psi_b) \cdot R_b - R_{bt})}{\sqrt{3} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \tan(\Psi_b) \right)}, \quad (3)$$

$$C_g = \frac{B_g}{\sqrt{2}} + 2 \cdot \frac{R_{bt}}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

где ψ_b — угол дилатации бетона при одноосном сжатии, который представляет собой результат деления нормы тензора объемных пластических деформаций на норму девиатора тензора пластических деформаций; B_g и C_g параметры, характеризующие пластический потенциал. Значения угла дилатации в зависимости от класса бетона построены на основании допущения, согласно которому при достижении поверхности прочности в области одноосного сжатия полные объемные деформации равны нулю [7]:

$$\Psi_b = \frac{R_b(1-2v)\cdot\sqrt{2}}{|2\cdot R_b(v+1)-3\cdot\epsilon_0\cdot E_b|}, \quad (5)$$

$$\epsilon_0 = \frac{(18+R_b)\cdot(62\cdot R_b+0.675\cdot R_b^2+22)}{(53000-62\cdot R_b)\cdot(7\cdot R_b+R_b^2+22)}. \quad (6)$$

3) Законы эволюции предельной поверхности, отвечающие за упрочнение и разупрочнение материала. В модели предусмотрены раздельные законы эволюции для сжатия и растяжения (см. рис. 1):

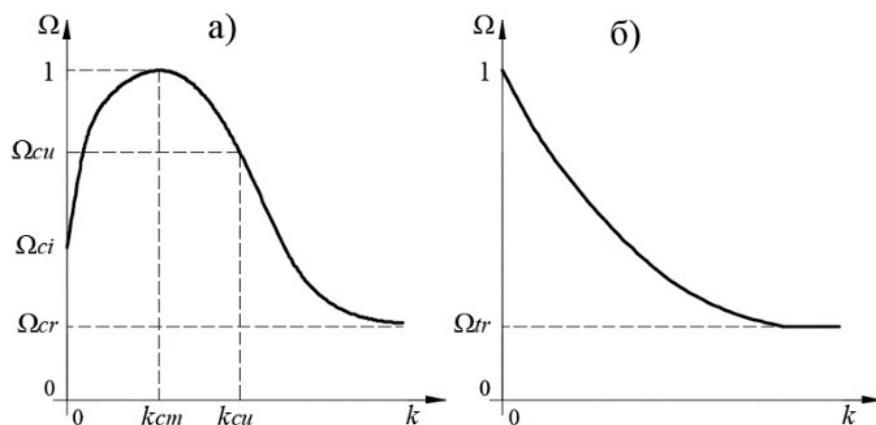


Рисунок 1 - Графическая интерпретация законов эволюции предельной поверхности при сжатии (a) и растяжении (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.1>

Численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS. Для описания поведения бетона использовалась конститутивная модель Менетрея–Виллама, хорошо зарекомендовавшая себя для анализа нелинейного поведения бетона, включая пластичность и разупрочнение. Поведение арматуры задавалось билинейной диаграммой с линейным упрочнением (модуль упрочнения принят равным $0,01 \cdot E_s$).

Параметры модели бетона. В расчетах использован тяжелый бетон класса В25. Нормативные и расчетные характеристики бетона приняты согласно СП 63.13330.2018:

Нормативное сопротивление осевому сжатию — $R_{bn} = 18,5$ МПа.

Нормативное сопротивление осевому растяжению — $R_{btr} = 1,55$ МПа.

Модуль упругости бетона, $E_b = 30000$ МПа.

Коэффициент Пуассона, $v = 0,2$.

Для задания модели Менетрея–Виллама в ANSYS использованы следующие ключевые параметры:

Предел прочности при одноосном сжатии, $f_c = R_{bn} = 18,5$ МПа.

Предел прочности при одноосном растяжении, $f_t = R_{btr} = 1,55$ МПа.

Отношение пределов прочности при двухосном и одноосном сжатии, $f_{bc}/f_c = 1,16$.

Отношение прочности при растяжении-скатии к прочности при одноосном растяжении, $f_{ub}/f_t=1,28$.

Угол дилатансии (расширения) $\Psi=15^\circ$.

Параметром, характеризующим разупрочнение материала при растяжении, является энергия разрушения G_F [9]. Данный параметр представляет собой количество энергии, которое необходимо сообщить материалу для того, чтобы прекратить передачу напряжений между берегами трещины (полностью разорвать межатомные связи). Величина энергии разрушения может быть найдена по формуле (8) согласно исследованию [8]. Концепция применения подобного способа регуляризации в рамках модели бетона ранее рассматривалась в работе [9].

$$G_f = 74 \cdot R_b^{0,18} \quad (7)$$

Поведение стали описывалось билинейной зависимостью с упрочнением (рис. 2).

Рисунок 2 - Билинейная диаграмма деформирования арматуры
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.2>

Триангуляция модели выполнена с размером конечного элемента 25мм, моделирование бетона выполнено с помощью Solid 186 (20-ти узловой КЭ) (рис. 3).

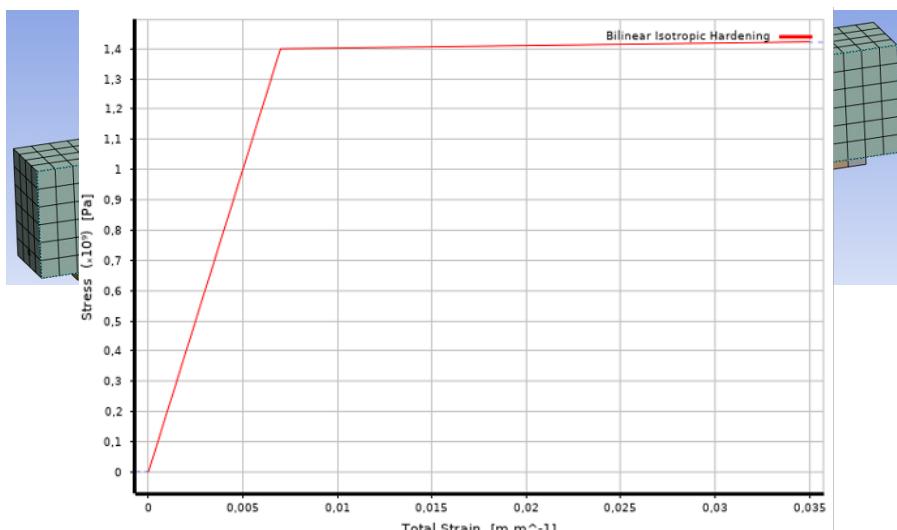


Рисунок 3 - Общий вид модели с разбиением на конечные элементы
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.3>

Армирование балки отдельными (гибкими) стержнями производилось объемными дискретными конечными элементами REINF264, преимуществом данного соотношения КЭ, является отсутствие необходимости разбиения триангуляционной сети таким образом, чтобы стержневые элементы соединялись с узлами объемных элементов (моделирующих бетон), следовательно, можно получить более качественную сетку моделей [10] (рис. 4).

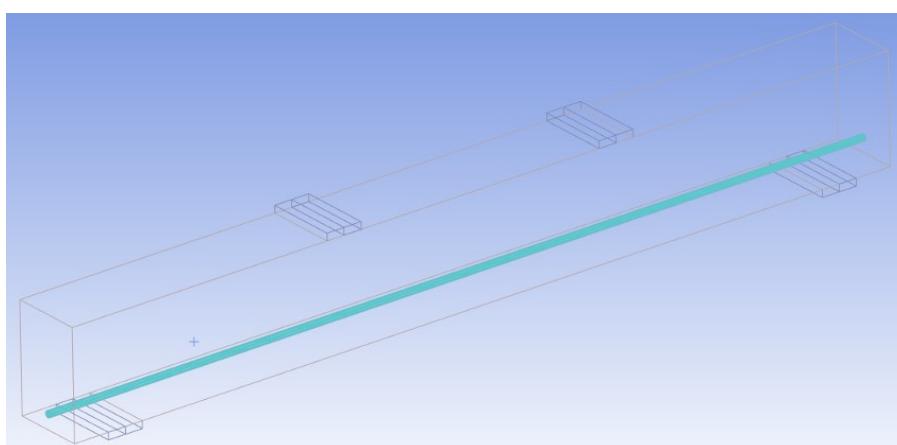


Рисунок 4 - Общий вид модели с армируемым стержнем
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.4>

Для подтверждения результатов, полученных с помощью численной модели, были проведены расчёты с условиями и характеристиками, которые соответствуют экспериментальным исследованиям.

Расчет модели выполнялся в два этапа, на первом этапе создавалась предварительное напряжение в балке, на втором этапе прикладывалась нагрузка через две металлические пластины, моделирующая экспериментальное нагружение.

Предварительное напряжение арматуры в численной модели выполнялось с помощью изменения температуры бетона, в результате заданные линейные температурные расширения арматуры как $1,2 \cdot 10^{-5}$ приводили к возникновению растягивающих усилий, тем самым создавая разные степени преднапряжения балки (рис. 5).

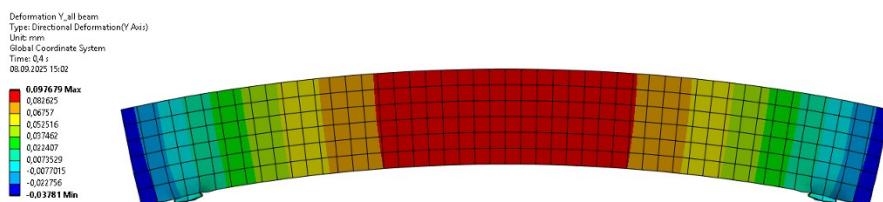


Рисунок 5 - Выгиб балки после предварительного напряжения арматуры

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.5>

Для проведения экспериментальных исследований были запроектированы и изготовлены 6 железобетонных образцов — балок прямоугольного сечения размерами 100x150 мм длиной 1200 мм. Диаметр закладываемого арматурного каната для 2-х групп по три образца составлял 9,6 мм, 12,5 мм. Также на этапе подготовки накладывались провода для корродирования в агрессивной среде каждые 200 мм по длине каната, оставляя в качестве анкеровки по 300 мм с каждой стороны. Усилие передавалось через заложенные цангги в теле бетона.

Сечение экспериментальной балки приведено на рисунке 6. Схема изготовление образцов продемонстрирована на рисунке 7.

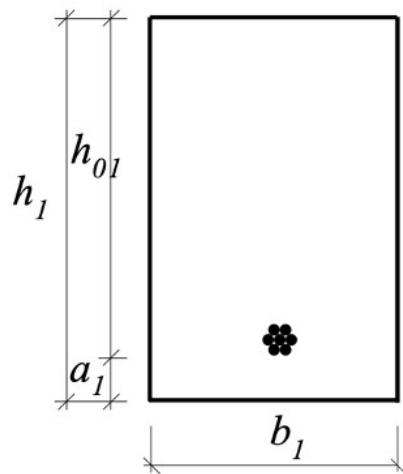


Рисунок 6 - Сечение экспериментальной железобетонной балки

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.6>

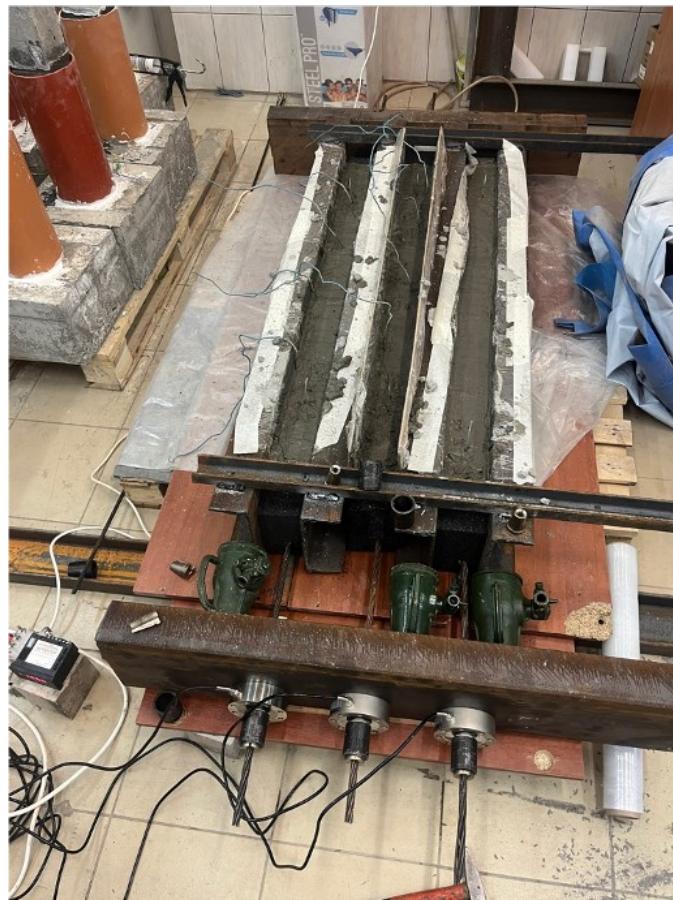


Рисунок 7 - Изготовление железобетонных балок-образцов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.7>

Усилия передавались через закладываемые цанги. После набора прочности балки помещались в ванночку с солевым раствором для ускоренной коррозии (рис. 8).



Рисунок 8 - Корродирование железобетонных образцов
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.8>

Для следующего этапа (проведение коррозии) была подготовлена емкость с водным 7% процентным раствором $NaCl$. Далее через провода параллельной цепочкой производилось подключение к источнику напряжения. Для расчета скорости коррозии использовался следующий закон:

$$i_{corr} = \frac{\gamma_s \cdot Z_{Fe} \cdot F \cdot \Delta d_s}{M_{Fe} \cdot t_\mu} \quad (8)$$

где γ_s — плотность стали, $7850 \text{ кг}/\text{м}^3$;

Z_{Fe} , M_{Fe} , F — характеристики стали,

Δd_s — разница между диаметром каната до и после корродирования, как целевые ставились 20 и 30%,

t_μ — количество дней, необходимое для достижения результата.

Получаем, что скорость коррозии для достижения 4-х образцов коррозии в 20% должна составлять

$$i_{corr} = \frac{7850 \cdot 2 \cdot 0,554 \cdot 1,96 \cdot 10^{-3}}{0,056 \cdot 14} = 21,74 \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \quad (9)$$

То есть, для поставленной задачи подаваемая сила тока составила 2,1 А. Подробно методика ускоренной коррозии описана и продемонстрирована в работе [11].

Далее были исследованы изменения прочности и деформативности изгибаемых железобетонных балок после корродирования преднатянутого каната (рис. 9). Целевое количество циклов нагружения составило 50 циклов, после чего образцы были доведены до разрушения.



Рисунок 9 - Пример образца при испытании
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.9>

Значение предварительного напряжения арматуры относительно нормативного сопротивления каната растяжению, принято равным значению, при котором в растянутой (верхней) зоне бетон достигает предельного значения прочности на растяжение, то есть:

$$M_{crc} = R_{bin} \cdot W \quad (10)$$

При замене получаем:

$$\sigma_s \cdot A_s \cdot h = R_{bin} \cdot W; \quad (11)$$

$$\sigma_s = \frac{0,0275 \cdot 375}{0,93 \cdot 2} = 5,54 \text{ м/см}^2 = 554 \text{ МПа.} \quad (12)$$

Нормативное сопротивление каната $R_{sn}=1400$ МПа, следовательно, относительное предварительное напряжение составит $554/1400=0,39$.

Потерю напряжения выразим следующим образом:

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_c = \frac{P_0}{A_0} - \frac{P_0}{A} = \frac{4P_0}{\pi d^2} - \frac{P_0}{A} = P_0 \left(\frac{4}{n\pi d^2} - \frac{1}{A} \right), \quad (13)$$

где n — количество проволок в канате.

Тогда в момент времени t потерю предварительного напряжения можно выразить как функцию уменьшения площади сечения каната в каждый момент времени:

$$\Delta\sigma = P_0 \left(\frac{4}{n\pi d^2} - \frac{1}{A(t)} \right). \quad (14)$$

где $A(t)$ — площадь сечения каната, поврежденного коррозией по (13).

Подобная методика и последовательность экспериментальных исследований позволяет:

1. Получить численные значения предельных нагрузок железобетонных балок с различной степенью коррозии преднапряженного каната при циклических нагрузлениях.

2. Определить изменения прогибов железобетонных балок в зависимости от степени коррозии преднапряженного каната.

3. Исследовать процессы деформирования и разрушения балок с корродированным канатом, выявить характер распространения трещин и потери несущей способности.

4. Определить снижение прочности и изменения механических характеристик преднапряженного каната в условиях коррозионного воздействия.

5. Исследовать коэффициент снижения прочности преднапряженного каната и влияние его деградации на общее напряженно-деформированное состояние балок.

6. Построить графики (напряжение — деформация) для преднапряженного каната с различной степенью коррозии при циклических нагрузках.

7. Построить графики $N-f$ (нагрузка — прогиб) для железобетонных балок с разной степенью коррозии преднапряженного каната.

8. Исследовать распространение коррозии внутри преднапряженного каната, определить скорость разрушения проволок и влияние коррозии на сцепление арматуры с бетоном.

Эксперимент был выполнен в испытательной лаборатории Института промышленного и гражданского строительства ФГБОУ Национального исследовательского «Московского Государственного Строительного Университета» с использованием установок:

1. Instron 8802 — для динамических нагрузений.

2. National Instruments LabVIEW 2010 — для регистрации деформаций при нагружениях.

Основные результаты

Предварительные расчеты показали, что стабильное решение численной модели выполняется при относительном предварительном напряжении каната 0,343, что соответствует растягивающему напряжению 480 МПа.

Выполнены расчеты трех типов моделей балок с различными параметрами, а именно:

- Балка без предварительного напряжения и коррозионных повреждений (№ 1);
- Балки идентичные экспериментальным образцам, имеющие процент коррозионных повреждений 0, 10%, 20% и соответствующие им потери предварительного напряжения 0, 5%, 8% (№ 2–№ 4);
- Балки с увеличенным относительно экспериментальных элементов коррозионным повреждением от 30% до 60% и соответствующие им потери предварительного напряжения от 11% до 20% (№ 5–№ 8).

Результаты выполненных расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты численных исследований экспериментальных балок

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.10>

№	% от R_{sn}	Преднап. с учетом потерь, МПа	A_s , см ²	Корр. повр., %	Потер. преднапр , %	Выгиб, см	Прогиб, см	σ_s , МПа	N, H
1	0	0	0,93	0	0	0	13,05	1332,6	81016
2	34,3	480	0,93	0	0	0,465	7,07	1401	90832
3	32,5	456	0,837	10	5	0,393	7,32	1401	83811
4	31,5	441,6	0,744	20	8	0,339	7,38	1403,9	76567
5	30,5	427,2	0,651	30	11	0,291	7,51	1403,7	68088
6	29,4	412,8	0,558	40	14	0,243	6,32	1401,3	58681
7	28,4	398,4	0,465	50	17	0,200	5,89	1404,7	50018
8	27,4	384	0,372	60	20	0,158	5,65	1404,1	40821

Примечание: A_s – площадь коррозионно-поврежденной арматуры; σ_s – напряжения в арматуре при достижении предельной нагрузки в модели; N – предельные усилия в модели; % от R_{sn} – значение предварительного напряжения относительно $R_{sn}=1400$ МПа

По результатам расчета численных моделей можно сделать вывод, что достижение предельной нагрузки обуславливается достижением условной площадки текучести каната.

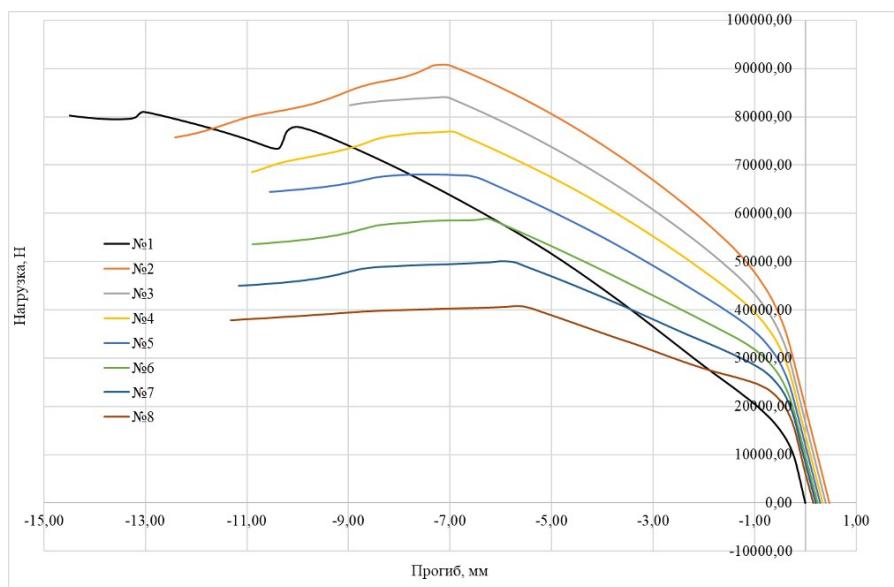


Рисунок 10 - График зависимости $N-f$ различных моделей балок

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.11>

На основании графической зависимости можно сделать вывод, что коррозионные повреждения и соответствующие им потери предварительного напряжения приводят к снижению несущей способности балок. Стоит отметить, что балка № 1, не имеющая предварительного напряжения на 84% имеет больше прогиб и на 10% меньше несущей способности относительно подобной балки, но с предварительно напряженной арматурой. Также можно отметить, что

в балках, имеющих коррозионные повреждения до 30% и соответствующие им потери предварительного напряжения до 11%, прогиб увеличивается, при большей коррозии арматуры и потери предварительного напряжения прогибы имею обратную зависимость, то есть уменьшаются, что говорит о чрезмерных коррозионных повреждениях и неестественной работе элемента.

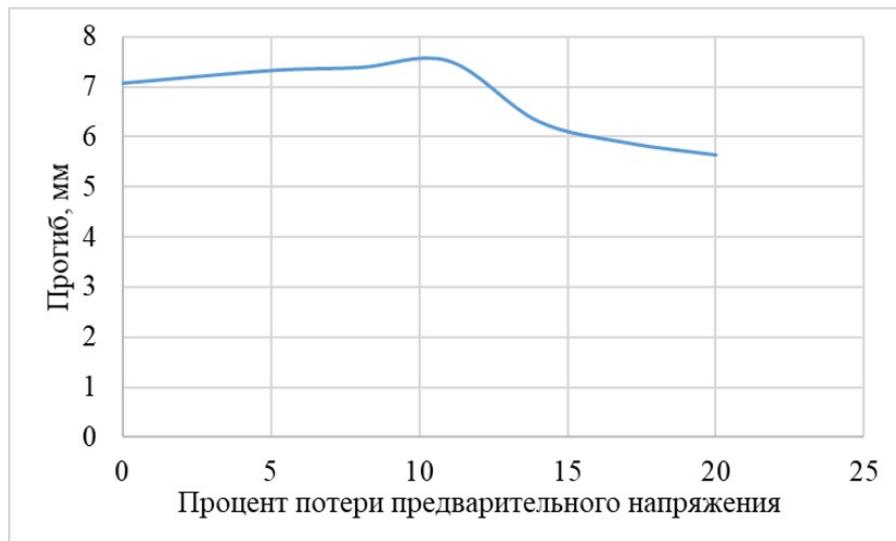


Рисунок 11 - График изменения прогиба балок в зависимости от процента потерь предварительного напряжения
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.12>

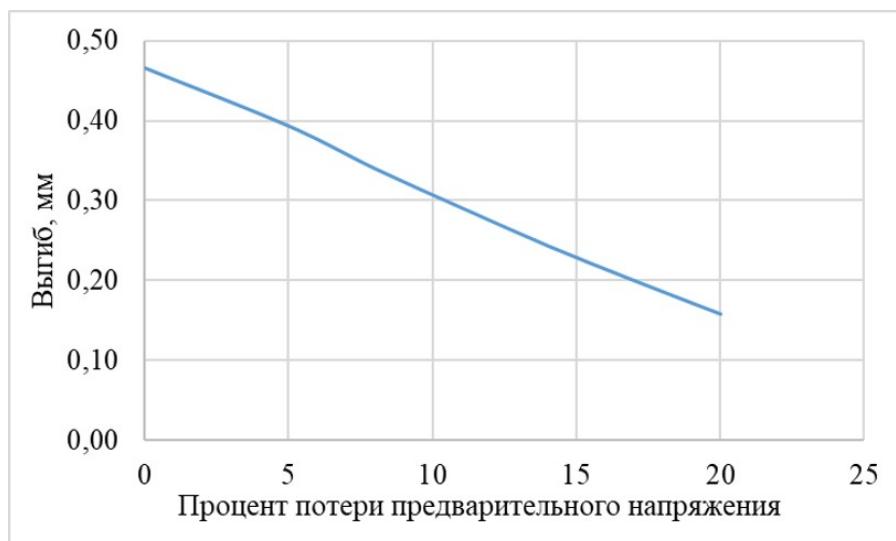


Рисунок 12 - График изменения выгиба балок в зависимости от процента потерь предварительного напряжения
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.13>

Стоит отметить, что в балках, имеющих коррозионные повреждения до 30% и соответствующие им потери предварительного напряжения до 11%, прогиб увеличивается, при большей коррозии арматуры и потери предварительного напряжения прогибы имею обратную зависимость, то есть уменьшаются, что говорит о чрезмерных коррозионных повреждениях и неестественной работе элемента.

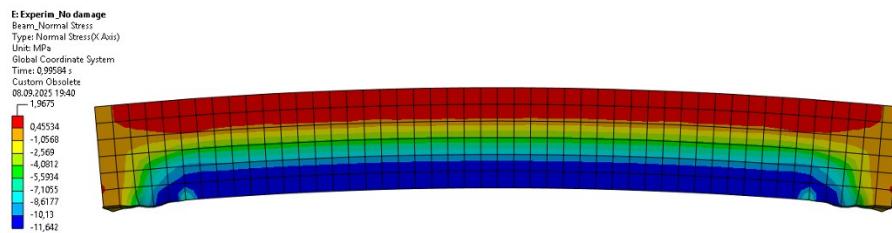


Рисунок 13 - Нормальные напряжения в балке после предварительного напряжения

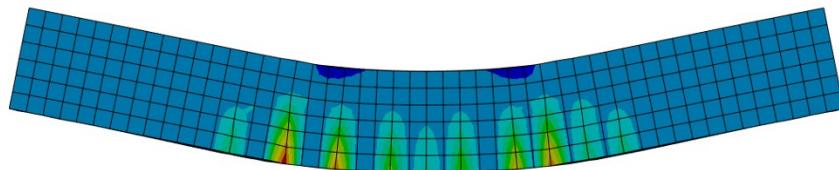
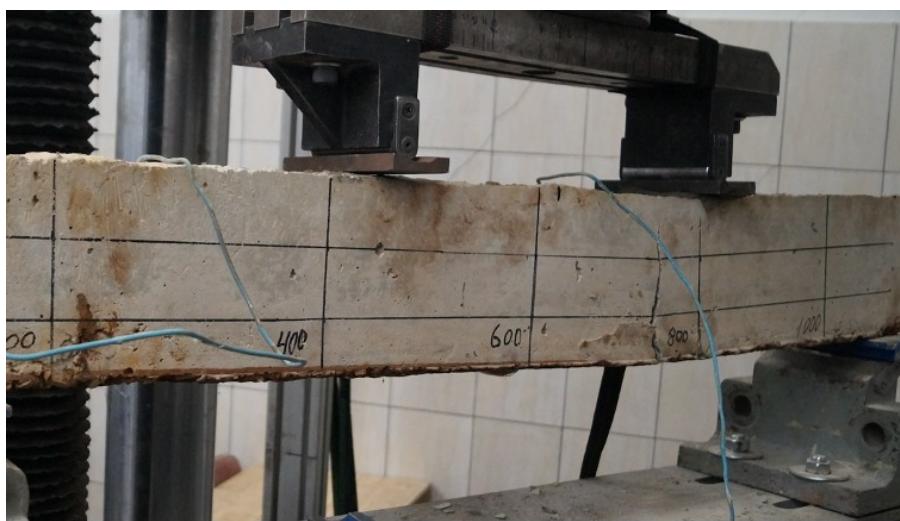
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.14>

Рисунок 14 - Расположение трещин в балке после достижения предельной нагрузки

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.15>

После нахождения балок в агрессивной среде они были испытаны при кратковременной нагрузке до разрушения. Значения деформаций и прогибов бетона в момент потери несущей способности составили $\approx 254 \cdot 10^{-5}$ и ≈ 13 мм (БПК 1.1–2.1), а также $\approx 184 \cdot 10^{-5}$ и ≈ 10 мм (БПК 1.2–2.2). Разница в значениях объясняется тем, что при длительном воздействии нагрузок микротрешины в бетоне, вызванные коррозией, становятся концентраторами напряжений, что приводит к значительному увеличению деформаций. В области максимальных изгибающих моментов отмечены зоны повышенных растягивающих напряжений в арматурном канате, что соответствует критическим точкам разрушения. Для балок с длительным воздействием агрессивной среды отмечено перераспределение напряжений, связанное с деградацией бетонной структуры и снижением сцепления арматуры с бетоном. Полученные результаты подтверждают необходимость учета коррозионных повреждений. Образец, доведенный до разрушения показан на рисунке 15. Характер разрушения совпадает с характером пластических зон в численной модели.

Рисунок 15 - Разрушение образцов
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.16>

Анализ полученных результатов показывает, что на величину деформаций и прогибов бетона решающее влияние оказывают уровень нагрузки, тип армирования и воздействие коррозии.

Сравнение разрушающей нагрузки образцов, полученной при проведении экспериментальных испытаний, со значениями предельной нагрузки, полученной в программном комплексе Ansys и представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты численных исследований балок

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.17>

№	Экспериментальная разрушающая нагрузка, кН	Разрушающая нагрузка в Ansys, кН	Сравнение, %
1	90,8	81,3	89,51
2	83,8	73,9	88,17
3	76,6	65,5	85,55

Полученная достоверная сходимость между численными расчетами и результатами экспериментальных исследований, позволяет выполнить расчет полноразмерной предварительно напряженной подкрановой балки и оценить ее напряженно-деформированное состояние при коррозионных повреждениях стальных канатов с потерей предварительного напряжения.

Рассматриваемая балка таврового сечения со сжатой полкой в сжатой зоне длиной 12,0 м, высотой 1,2 м, шириной и высотой полки 0,65 м и 0,18 м соответственно. Армированная продольной арматурой из канатов К7 с условным пределом текучести $R_{sn}=1400$ МПа, диаметр стержней принят 15,2 мм ($A_s=139$ мм 2). В нижней зоне балки установлено шесть стержней, в верхней зоне четыре стержня (рис. 16).

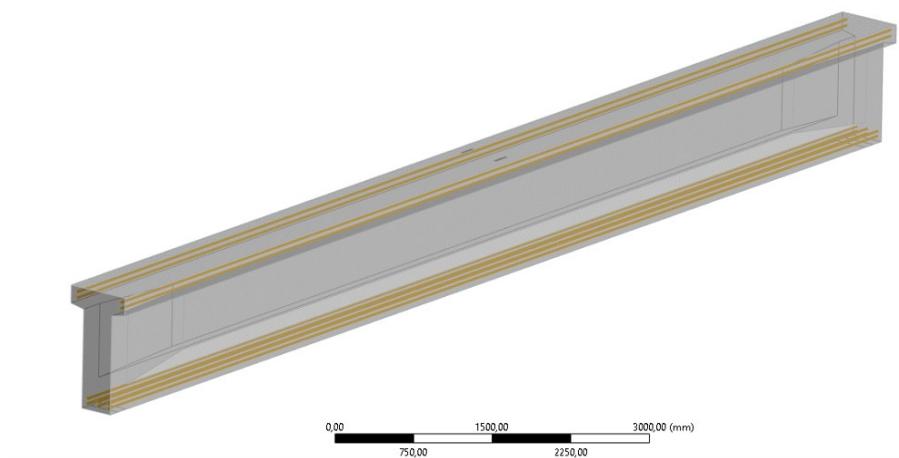


Рисунок 16 - Общий вид балки
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.18>

Триангуляция модели выполнена с размером конечного элемента 50мм, моделирование бетона выполнено с помощью Solid 186, 187 (20-ти узловой КЭ) и Solid (20-и и 10-и узловый КЭ). Армирование балки отдельными (гибкими) стержнями производилось объемными дискретными конечными элементами REINF264 (рис. 17).

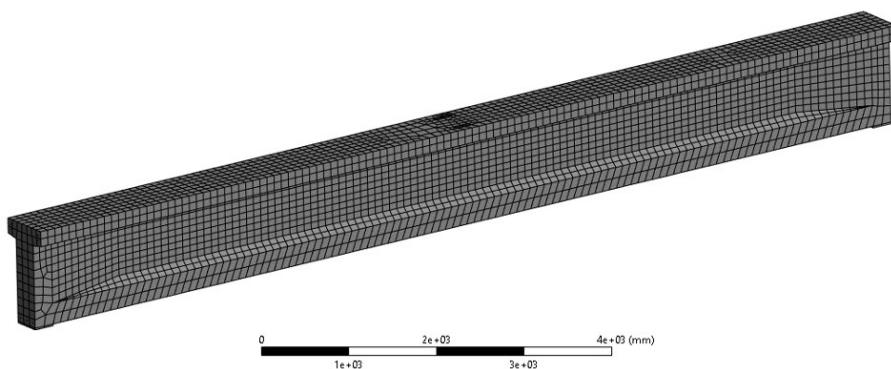


Рисунок 17 - Триангуляция балки
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.19>

Нагружение выполнялось в срединную часть балки через две металлические закладные детали.

Уменьшение площади сечения каната и потеря предварительного напряжения принималась аналогичной, как и в экспериментальных исследованиях. В таблице 3 приведены результаты численного исследования балки.

Таблица 3 - Результаты численных исследований полноразмерных балок

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.20>

№	% от R_{sn}	Преднап. с учетом потерь, МПа	A_s , см ²	Корр. повр., %	Потер. преднапр , %	Выгиб, см	Прогиб, см	σ_s , МПа	N, H
1	0	0	8,34	0	0	0	15,02	437,4	77993
2	90	1260	8,34	0	0	1,6300	41,77	1401	235790,0
3	85,5	1197	7,506	10	5	1,2568	40,481	1403	213090,0
4	82,8	1159,2	6,672	20	8	0,9384	40,54	1402	194080,0
6	80,1	1121,4	5,838	30	11	0,63412	38,49	1401	169580,0
7	77,4	1083,6	5,004	40	14	0,3438	39,92	1404	150720,0
8	74,7	1045,8	4,17	50	17	0,07	38,28	1405	127570,0
9	72	1008	3,336	60	20	0,05	17,84	1326	89986,0

Примечание: A_s – площадь коррозионно-поврежденной арматуры; σ_s – напряжения в арматуре при достижении предельной нагрузки в модели; N – предельные усилия в балке; % от R_{sn} – значение предварительного напряжения относительно $R_{sn}=1400$ МПа

На рисунках 18 и 19 представлены деформации, возникающие в бетоне при достижении предельной нагрузки в балке.

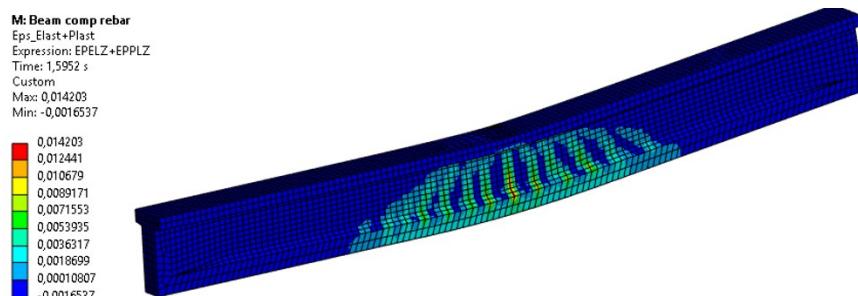


Рисунок 18 - Возникающие деформации в бетоне при достижении предельной нагрузки в балке
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.21>

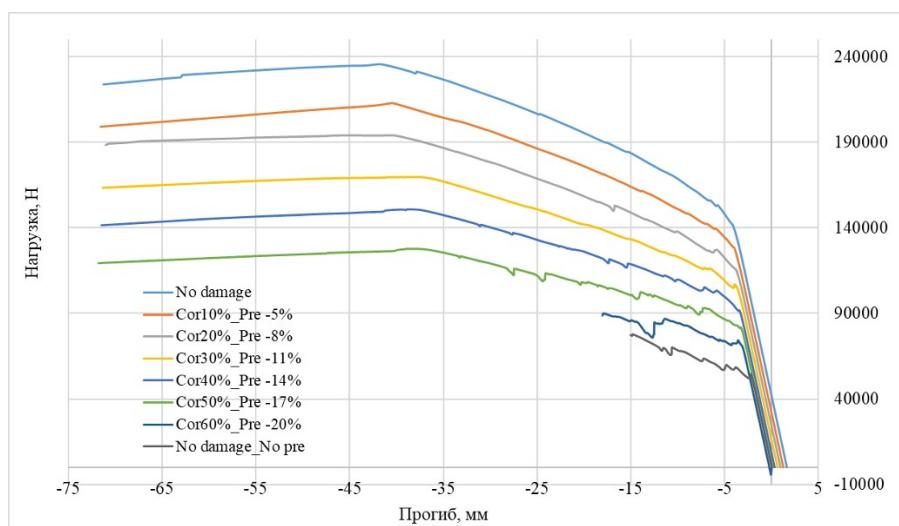


Рисунок 19 - График возникающих деформаций в бетоне при достижении предельной нагрузки в балке
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.69.12.22>



Заключение

Сравнительный анализ несущей способности в экспериментальных образцах с результатами численного расчета имеет достаточно хорошую сходимость, что показывает корректность принятых прочностных и жесткостных характеристик материалов, типов конечных элементов, граничных условий, использование моделей поведения бетона и арматуры и как результат позволяют достоверно проводить численные исследования данных моделей изменения тип и степень предварительного напряжения каната.

Проведенные комплексные экспериментальные и численные исследования позволили получить следующие новые научные результаты:

1. Разработана и верифицирована детализированная конечно-элементная модель, позволяющая адекватно оценивать снижение несущей способности и изменение характера работы предварительно напряженных изгибаемых элементов при коррозионном повреждении арматуры. Новизна модели заключается в комплексном учете:

- Уменьшения площади сечения арматуры.
- Снижения уровня предварительного напряжения как следствия коррозии.

2. Установлен и количественно оценен нелинейный характер влияния степени коррозии на деформативность. Получены данные, показывающие, что при коррозии до 30% прогибы балок увеличиваются, а при дальнейшем развитии повреждений (40–60%) наблюдается их аномальное уменьшение, что свидетельствует о переходе к хрупкой форме разрушения и потере эксплуатационной пригодности элемента.

3. Результаты численного исследования показывают, что достижение предельной нагрузки обуславливается достижением условной площадки текучести, за исключением балки не имеющей предварительного напряжения и модели, имеющей 60% коррозионного повреждения арматуры. Следовательно, можно сделать вывод, что значительные коррозионные повреждения и потеря предварительного напряжения арматуры приводят к смене типа разрушения, то есть с пластического к хрупкому.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Тамразян А.Г. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении / А.Г. Тамразян, Д.С. Попов // Промышленное и гражданское строительство. — 2019. — № 2. — С. 19–26.
2. Dmitriev A. Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete / A. Dmitriev, Y. Novozhilov, D. Mikhalyuk [et al.] // Construction of Unique Buildings and Structures. — 2020. — Vol. 88. — P. 84–91.
3. Тамразян А.Г. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой / А.Г. Тамразян, Т.А. Мацеевич // Строительство и реконструкция. — 2022. — № 1 (99). — С. 89–98.
4. Корсун В.И. Современные критерии прочности для бетонов при объемных напряженных состояниях / В.И. Корсун, С.Н. Карпенко, С.Ю. Макаренко [и др.] // Строительство и реконструкция. — 2021. — № 5 (97). — С. 16–30.
5. Jirásek M. Inelastic Analysis of Structures / M. Jirásek, P.B. Zdenek. — England : John Wiley & Sons, 2002. — 719 p.
6. Menetrey P. Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures : dis. ... of PhD in Engineering / P. Menetrey. — Lausanne, 1994. — 179 p.
7. Бударин А.М. Деформационно-прочностная модель бетона с двойным независимым упрочнением и повреждением / А.М. Бударин, Г.И. Ремпель, А.А. Камзолкин [и др.] // Вестник МГСУ. — 2024. — Т. 19. — № 4. — С. 527–543. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.527-543. — EDN IIJBPQ.
8. Menetrey P. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization / P. Menetrey, K.J. Willam // ACI Structural Journal. — 1995. — Vol. 92. — № 3. — P. 311–318.
9. Červenka J. On crack band model in finite element analysis of concrete fracture in engineering practice / J. Červenka, V. Červenka, S. Laserna // Engineering Fracture Mechanics. — 2018. — Vol. 197. — P. 27–47.
10. Страхов Д.А. Применение высокопрочного бетона в балках с предварительным напряжением арматуры / Д.А. Страхов, Д.З. Гизатуллина, К.И. Молев // Современное строительство и архитектура. — 2023. — № 2 (33). — С. 4–10.
11. Тамразян А.Г. Сравнение перераспределения моментов в корродированных и некорродированных статически неопределеных железобетонных балках / А.Г. Тамразян, Й. Сайед // Вестник МГСУ. — 2024. — Т. 19. — № 4. — С. 557–568.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Tamrazyan A.G. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie korrozionno-povrezhdennyh zhelezobetonnyh elementov pri dinamicheskem nagruzhenii [Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading] / A.G. Tamrazyan, D.S. Popov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. — 2019. — № 2. — P. 19–26. [in Russian]



2. Dmitriev A. Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete / A. Dmitriev, Y. Novozhilov, D. Mikhalyuk [et al.] // Construction of Unique Buildings and Structures. — 2020. — Vol. 88. — P. 84–91.
3. Tamrazyan A.G. Analiz nadezhnosti zhelezobetonnoj plity s korrodirovannoj armaturej [Reliability analysis of reinforced concrete slabs with corroded reinforcements] / A.G. Tamrazyan, T.A. Matseevich // Stroitel'stvo i rekonstrukciya [Building and Reconstruction]. — 2022. — № 1 (99). — P. 89–98. [in Russian]
4. Korsun V.I. Sovremennye kriterii prochnosti dlya betonov pri ob'emnyh napryazhennyh sostoyaniyah [Modern strength criteria for concrete under triaxial stress states] / V.I. Korsun, S.N. Karpenko, S.Yu. Makarenko [et al.] // Stroitel'stvo i rekonstrukciya [Building and Reconstruction]. — 2021. — № 5 (97). — P. 16–30. [in Russian]
5. Jirásek M. Inelastic Analysis of Structures / M. Jirásek, P.B. Zdenek. — England : John Wiley & Sons, 2002. — 719 p.
6. Menetrey P. Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures : dis. ... of PhD in Engineering / P. Menetrey. — Lausanne, 1994. — 179 p.
7. Budarin A.M. Deformacionno-prochnostnaya model' betona s dvojnym nezavisimym uprochneniem i povrezhdением [Concrete damage-plasticity model with double independent hardening] / A.M. Budarin, G.I. Rempel, A.A. Kamzolkin [et al.] // Vestnik MGСU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. — 2024. — Vol. 19. — № 4. — P. 527–543. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.527-543. — EDN IIJBPQ. [in Russian]
8. Menetrey P. Triaxial failure criterion for concrete and its generalization / P. Menetrey, K.J. Willam // ACI Structural Journal. — 1995. — Vol. 92. — № 3. — P. 311–318.
9. Červenka J. On crack band model in finite element analysis of concrete fracture in engineering practice / J. Červenka, V. Červenka, S. Laserna // Engineering Fracture Mechanics. — 2018. — Vol. 197. — P. 27–47.
10. Strakhov D.A. Primenenie vysokoprochnogo betona v balkah s predvaritel'nym napryazheniem armatury [Application of high-strength concrete in beams with pre-stressed accessor] / D.A. Strakhov, D.Z. Gizatullina, K.I. Molev // Sovremennoe stroitel'stvo i arhitektura [Modern Construction and Architecture]. — 2023. — № 2 (33). — P. 4–10. [in Russian]
11. Tamrazyan A.G. Sravnenie pereraspredeleniya momentov v korrodirovannyh i nekorrodirovannyh staticheski neopredelimyh zhelezobetonnyh balkah [Comparing moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams with and without corrosion] / A.G. Tamrazyan, J. Sayed // Vestnik MGСU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. — 2024. — Vol. 19. — № 4. — P. 557–568. [in Russian]