

На правах рукописи



Андреев Илья Федорович

НАДЕЖНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОДКРАНОВЫХ  
БАЛОК ПРИ КОРРОЗИИ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: **Мацеевич Татьяна Анатольевна**  
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные  
оппоненты: **Смоляго Геннадий Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Строительство и городское  
хозяйство» ФГБОУ ВО «Белгородский  
государственный технологический университет им.  
В.Г. Шухова».

**Левитский Валерий Евгеньевич**  
кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры «Строительные конструкции, здания и  
сооружения» ФГАОУ ВО «Российский университет  
транспорта».

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный инженерно-технологический университет», ФГБОУ ВО «БГИТУ»

Защита состоится «04» июня 2026 г., в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 75.1.078.01 на базе Акционерного общества «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений - ЦНИИПромзданий» по адресу: 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, дом 46, корп.2., ауд. 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте АО «ЦНИИПромзданий», [www.cniipz.ru](http://www.cniipz.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Терехов Иван Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Проблема коррозионного повреждения железобетонных конструкций остается одной из наиболее актуальных в современном строительстве, несмотря на значительный объем проведенных исследований. Особую важность этот вопрос приобретает для ответственных конструкций, таких как железобетонные подкрановые балки, где сочетание динамических, многоцикловых нагрузок и коррозии способны существенно снижать запас прочности. Существующие научные работы и подходы предлагают методы оценки коррозии для стержневой арматуры, но не учитывают специфику преднапряженных канатов, где коррозия проволок приводит к неравномерному перераспределению усилий и потерь предварительного натяжения.

Железобетонные подкрановые балки в промышленных зданиях подвергаются циклическим динамическим воздействиям от работы кранового оборудования, что может способствовать ускорению процесса коррозионного повреждения арматурного каната и балки в целом. Отсутствие метода оценки надежности таких элементов может привести к непрогнозируемому сроку эксплуатации и преждевременному достижению предельных состояний.

Совместное влияние коррозии арматурного каната и циклических нагрузок на надежность не рассматривалось ранее, так как надежность строительных конструкций традиционно оценивается с учетом статических воздействий.

Данное исследование направлено на разработку метода оценки надежности, объединяющей влияние коррозионной деградации и циклических воздействий. Таким образом, работа направлена на дополнение научно-практического опыта в области оценки надежности железобетонных подкрановых балок с преднапрягаемыми арматурными канатами при циклическом нагружении с учетом потерь предварительного напряжения.

Детальные исследования свойств железобетонных конструкций с преднапряженными канатами, подверженных коррозии и циклическим нагрузкам, актуальны для промышленных объектов, мостов и других объектов капитального строительства.

**Степень разработанности темы.** Решение задачи по оценке надежности подкрановых балок, армированных преднапряженными арматурными канатами, при развитии коррозии требует проведения комплекса научных и экспериментальных исследований.

Исследованию коррозионно-поврежденных железобетонных конструкций посвящены работы Берлинова М.В., Бондаренко В.М., Е.А., Дронова А.В., Колчунова В.И., Меркулова С.И., Овчинникова И.Г., Овчинникова И.И., Пахомовой Е.Г., Петрова В.В., Полака А.Ф., Попеско А.И., Попова Д.С.,

Прокоповича А.А., Селяева В.П., Смоляго Г.А., Степановой В.Ф., Тамразяна А.Г., Федоровой Н.В., Филатова В.Б., Dang V.H., Du Y., Feng R., Fernandez I., Ye H., и др.

Исследованиям влияния динамических, циклических и сейсмических нагрузок на несущую способность железобетона посвящены труды Баженова Ю.М., Берга О.Я., Гвоздева А.А., Звездова А.И., Кабанцева О.В., Кодыша Э.Н., Копаницы Д.Г., Крылова С.Б., Кумпяка О.Г., Курбацкого Е.Н., Маиляна Р. Л., Маиляна Д.Р., Мирсаяпова И.Т., Тамразяна А.Г., Травуша В.И., Трекина Н.Н., Федорова В.С., Хегая А.О., R. Saara, A. Mattoc, G. Tyler, T.Chang и др.

Исследованием надежности конструкций занимались: Болотин В.В., Долганов А.И., Мацеевич Т.А., Мкртычев О.В., Модры С., Перельмутер А. В., Пшеничкина В.А., Райзер В.Д., Ржаницын А.Р., Складнев Н.Н., Тамразян А.Г., Тур В.В., Чирков В.П., Ditlevsen O., Madsen H.O., Holicky M., Rackwitz R., Kahle W., Stewart M.G. и др.

Работы по образованию и распространению коррозии в арматурном канате и ее влияния на общее напряженно-деформированное состояние балочных элементов требуют комплексного рассмотрения. Несмотря на наличие большого числа работ, посвященных надежности и влиянию коррозионных эффектов, недостаточно проработаны модели, связывающие коррозию с потерей прочности и пластичности проволок в составе каната при циклических нагрузках в подкрановой балке.

**Научно-техническая гипотеза.** Предполагается, что надежность коррозионно-поврежденных предварительно напряженных железобетонных подкрановых балок зависит от интенсивности и характера распространения коррозии проволок в арматурном канате и потерь предварительного напряжения.

**Цель диссертационной работы** - разработка метода расчета надежности железобетонных подкрановых балок с учетом потерь предварительного напряжения при коррозии арматурных канатов.

Для достижения указанной цели поставлены **следующие задачи**:

1. Проанализировать существующие исследования воздействия коррозии и циклических нагрузений на физико-механические свойства изгибаемых железобетонных элементов, оценки их надежности в работах отечественных и зарубежных ученых;

2. Разработать модель распространения коррозии в преднапряженном арматурном канате; оценить потери предварительного напряжения;

3. Разработать модель влияния скорости (распространения) коррозии на возможность воспринимать циклические нагружения;

4. Разработать метод оценки надежности предварительно напряженной подкрановой балки при коррозии;

5. Провести экспериментальное исследование коррозионно-поврежденных преднапрягаемых железобетонных элементов при коррозии арматурных канатов;

6. Провести сравнительный анализ полученных результатов экспериментальных исследований коррозионно-поврежденных преднапрягаемых железобетонных элементов и результатов численного моделирования в программном комплексе ANSYS.

**Объектом исследования** являются подкрановые балки с поврежденными коррозией преднапряженными арматурными канатами.

**Предметом исследований** является оценка надежности подкрановой балки с учетом коррозии арматурного каната.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Разработан метод оценки надежности железобетонной подкрановой балки при совместном действии коррозии и циклических нагрузок.

2. Разработана модель распространения коррозионного повреждения проволок в арматурных канатах с учетом их расположения в подкрановой балке.

3. Разработана методика оценки потерь преднапряжения железобетонной подкрановой балки с учетом коррозии в арматурном канате.

4. Получена вероятностная оценка остаточного ресурса преднапряженных железобетонных подкрановых балок при различных уровнях коррозии в канатах.

**Теоретическая значимость.** Исследование вносит вклад в развитие теории надежности железобетонных конструкций, учитывающей коррозионные процессы, и расширяет методы расчета предельных состояний, применимых к конструкциям, подвергающимся воздействию агрессивных сред. Разработанный метод может быть применен для построения математических моделей и проведения вероятностных расчетов надежности предварительно напряженных железобетонных конструкций в зависимости от времени эксплуатации.

**Практическая значимость** исследования определяется возможностью использования разработанных методов и методик для расчета и оценки надежности предварительно напряженных железобетонных подкрановых балок, подверженных коррозионным воздействиям, при разработке нормативных документов. Результаты исследования могут быть применены при оценке технического состояния железобетонных подкрановых балок и разработке мероприятий по их усилению в условиях коррозионного повреждения.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод оценки надежности железобетонной подкрановой балки с учетом коррозионных повреждений проволок в арматурном канате и циклических нагрузений.

2. Модель распространения коррозии в арматурных канатах подкрановой балки, учитывающая локализацию коррозионных повреждений в проволоках и их влияния на несущую способность.

3. Методика оценки потерь преднапряжения железобетонной подкрановой балки с учетом коррозии в арматурном канате.

4. Вероятностная оценка остаточного ресурса преднапряженных железобетонных подкрановых балок при различных уровнях коррозии канатов и циклических нагрузках.

**Методология и методы исследования.** В исследовании применялись теоретический анализ, методы статистического моделирования, а также методы численного моделирования для оценки надежности железобетонных конструкций с учетом коррозионных процессов. Для моделирования работы конструкции в условиях коррозии и циклического нагружения в основу легла теория железобетона. Использовались методы вероятностного анализа, основанные на теории предельных состояний, а также специальные расчеты для оценки надежности подкрановых балок в условиях коррозии и циклического нагружения. Математическое моделирование проводилось с использованием программных средств, позволяющих учитывать изменения физико-механических характеристик материалов.

**Личный вклад автора** состоит в разработке и адаптации метода оценки надежности для железобетонной подкрановой балки с учетом коррозионного воздействия и циклических нагрузок, описании модели распространения коррозии и потери предварительного напряжения в арматурном канате, в проведении экспериментальных исследований и численного моделирования, анализе полученных результатов для разработки подходов к обеспечению надежности конструкций при воздействии агрессивной среды.

**Степень достоверности результатов исследования.** Достоверность результатов обеспечивается применением апробированных методов расчета предельных состояний, а также численного моделирования для получения объективных данных о надежности железобетонных конструкций. Верификация моделей проводилась на основе существующих данных и сравнительного анализа с результатами экспериментальных исследований.

**Реализация результатов исследования.** Результаты исследования могут быть применены при разработке нормативных документов и рекомендаций по проектированию и оценке надежности предварительно напряженных железобетонных конструкций. Предложенная методика может быть использована для расчета предварительно напряженных корродированных железобетонных конструкций в строительной практике.

**Внедрение результатов исследования.** Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «СИБУР ПОЛИЛАБ».

**Апробация результатов исследований.** Основные результаты диссертационной работы прошли апробацию на следующих конференциях:

«Безопасность строительного фонда России» (Международные академические чтения, г. Курск, 2023), «Инновации в строительстве» (г. Брянск, 2023, 2024), International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering: "Construction – The Formation of Living Environment" (FORM-2024) (г. Москва, 2024), «XVI Академические чтения» (НИИСФ РААСН, г. Москва, 2025), III международный научно-практический симпозиум «Будущее строительной отрасли: вызовы и перспективы развития» (НИУ МГСУ, г. Москва, 2025).

В полном объеме диссертационная работа докладывалась на научном семинаре кафедры железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВО МГСУ (г. Москва, 06 мая 2025г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных статей и докладов, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности:** содержание диссертации соответствует пункту 3 паспорта научной специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения:

п. 3. Развитие теории и методов оценки напряженного состояния, живучести, риска, надежности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, 1 приложения. Общий объем диссертации 164 страницы машинописного текста, в том числе 51 рисунок, 30 таблиц, список литературы из 165 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д. ф-м. н., профессору Мацеевич Татьяне Анатольевне за ценные консультации и постоянное внимание к работе.

Автор признателен сотрудникам и заведующему кафедрой Железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ за поддержку и помощь при подготовке диссертационной работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** к работе представлено обоснование актуальности выбранной темы исследования, проведён анализ степени её разработанности в современной научной литературе с выделением нерешённых вопросов. Сформулированы цель и задачи исследования, определяющие направление работы. Определены научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** проведен комплексный анализ научных работ, посвященных проблемам надежности железобетонных конструкций, а также поведению конструкций при циклических нагрузках. Особое внимание уделено исследованиям железобетонных конструкций при коррозионных повреждениях.

Современные исследования в области надежности железобетонных конструкций накопили значительный объем знаний о коррозионных процессах и внешних нагрузках, рассматриваемых по отдельности, однако их совместное воздействие на преднапряженные конструкции, особенно в части работы арматурных канатов, остается недостаточно изученным. Выявлено отсутствие метода оценки надежности при одновременном воздействии коррозии и динамических нагрузок.

Существующие подходы фокусируются на геометрических параметрах коррозионных повреждений, но не учитывают: изменения напряженно-деформированного состояния; взаимодействие коррозионных проволок между собой в арматурном канате; перераспределение усилий и потерю предварительного напряжения в многопроволочных канатах.

Изучены существующие экспериментальные и численные исследования железобетонных изгибаемых элементов при циклических нагружениях и коррозионных повреждениях.

В результате анализа научной литературы по рассматриваемой теме поставлены цели и задачи настоящего исследования.

**Во второй главе** разработана методика, которая учитывает изменение диаметра арматурных канатов во времени, что позволяет оценить снижение их несущей способности при циклических нагрузках и воздействии агрессивной среды. Установлено, что параметры модели оказывают значительное влияние на надежность конструкций.

Распространение или рост коррозии обычно выражается в терминах скорости коррозии  $r_c$ , или плотности тока коррозии  $i_{corr}$  в соответствии с соотношением между  $r_c$  и  $i_{corr}$ . Плотность тока коррозии представляет собой приблизительно равномерную потерю металла по всей открытой поверхности арматурной проволоки. Диаметр корродирующего арматурного стержня в момент времени  $t$   $D(t)$  может быть оценен непосредственно по  $i_{corr}$  как

$$D(t) = D_0 - 2 \int_0^t r_c dt = D_0 - 0.0232 \int_0^t i_{corr} dt, \quad (1)$$

где  $D_0$  - первоначальный диаметр арматуры (мм), коэффициент 2 учитывает процесс распространения коррозии со всех сторон арматуры, а  $\int_0^t r_c dt$  представляет собой рост коррозии в данный момент времени  $t$ .

Изменение площади сечения арматурного каната при коррозии представлено в виде:

$$A(t) = A_0 - \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} (d_0 - 0.0232 \int_0^t i_{corr} dt)^2, \quad (2)$$

где  $A_0$  – начальная площадь поперечного сечения арматурного каната,  $d_0$  – диаметр проволоки арматурного каната,  $n$  – количество проволок в арматурном канате.

Надежность конструкции (вероятность ее безотказной работы) можно определить через индекс надежности  $\beta$ :

$$P_s = 1 - P_f = 0,5 + \Phi(\beta), \quad (3)$$

где  $\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\beta e^{-\frac{t}{2}} dt$  – интеграл Лапласа.

Индекс надежности корродированной проволоки каната в подкрановой балке в зависимости от времени может быть рассчитан следующим образом:

$$\beta_e(t) = \frac{\overline{A_0} - \overline{A(t)}}{\sqrt{(\overline{A_0} \cdot CV_{A_0})^2 + \sigma_{A(t)}^2}}, \quad (4)$$

где  $\overline{A_0}$  – среднее значение площади сечения некорродированной проволоки;

$\overline{A(t)}$  – среднее значение площади сечения корродированной проволоки;

$CV_{A_0}$  – коэффициент вариации;

$\sigma_{A(t)}^2$  – дисперсия изменения площади сечения корродированной проволоки в зависимости от времени.

Значения среднего, стандарта и коэффициента вариации получают из результатов испытаний.

В свою очередь, индекс надежности каната  $\beta_{sys}$  определяется выражением:

$$\beta_{sys} = \beta_e(t) \cdot \sqrt{\frac{n}{1+(n-1)\bar{r}}}. \quad (5)$$

где  $\beta_e(t)$  – индекс надежности отдельной проволоки,  $\bar{r}$  – усредненный коэффициент корреляции,  $n$  – количество проволок в канате.

На рис. 1 показаны различные сценарии корродирования проволок каната.

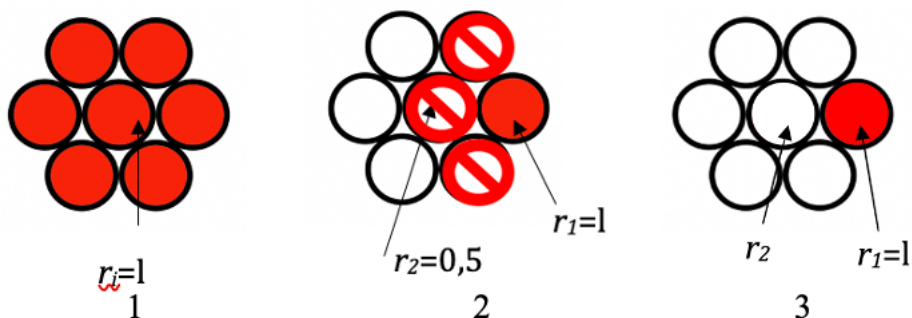


Рисунок 1 – Случаи коррозии между проволоками арматурного каната

Дефектная проволока принимается как  $r_i=1$ , а частичная коррозия принимается как  $r_i=0,5$ .

Учитывая статистическую независимость проволок в канате, можно рассмотреть три случая:

Случай 1: повреждение одной проволоки влияет одинаково на повреждение всех проволок в канате (зависимый характер).

Случай 2: повреждение одной проволоки ( $r_1=1$ ) может повлиять на соседние проволоки (если одна из них повреждена:  $r_1=1$ , то соседние проволоки могут быть частично повреждены:  $r_2=0,5$ ).

Случай 3: повреждение одной проволоки не влияет на повреждения всех других проволок (независимый характер).

На рис. 2 показаны графики индексов надежности для всех трех случаев, описанных выше.

В работе рассматривается коррозия, которая распространяется 2 способами (рис. 3). Способ а) рассматривается равномерное уменьшение сечения проволоки по части ее периметра. Способ б) рассматривается уменьшение сегмента сечения проволоки.

Площадь корродированного участка  $A_{corr}$  для случая а) определяется следующим образом:

$$A_{corr} = \frac{\pi h}{2} (d - h). \quad (6)$$

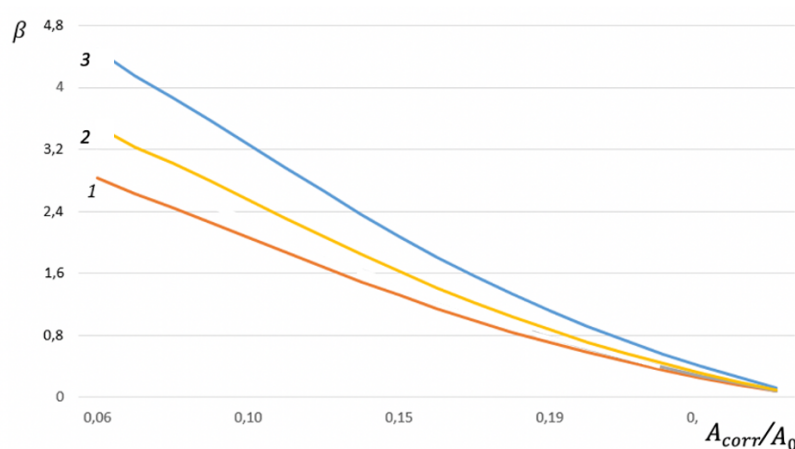
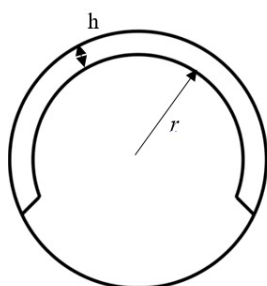
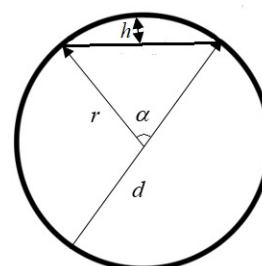


Рисунок 2 – Индекс надежности каната К1400 для 3-х случаев в зависимости от доли повреждения



а) уменьшение сечения равномерно по части периметра проволоки



б) уменьшение сечения сегментально

Рисунок 3 – Схемы распространения коррозии в проволоке

С учетом того, что принимаем развитие коррозии до области соприкосновения с соседними проволоками, имеем  $A_{corr} = \frac{\pi h}{3}(d - h)$ .

При равномерном уменьшении сечения проволоки со стороны агрессивного воздействия (случай а):

$$A = A_0 - \frac{\pi h}{3}(d - h) \quad (7)$$

где  $d$  - диаметр проволоки,  $h$  - глубина коррозии.

Для случая б) усредненно принимаем площадь части сегмента:

$$A_{corr} = \frac{d^2}{8}(\alpha - \sin\alpha). \quad (8)$$

В данном случае глубину коррозии принимаем равной:

$$h = \frac{d}{2}\left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (9)$$

Скорость коррозии соседних проволок  $i_{corr}$  зависит от степени повреждения исходной проволоки:

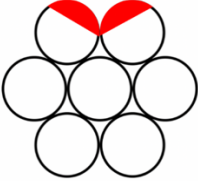
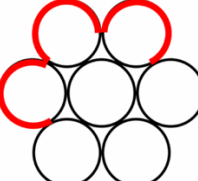
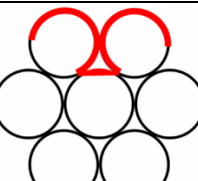
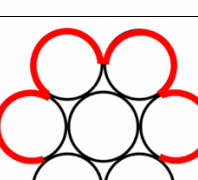
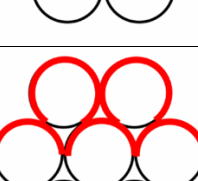
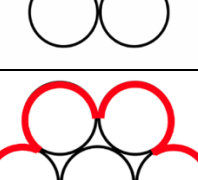
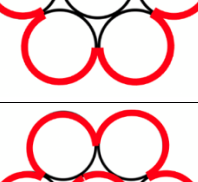
$$i_{corr} = i_{corr,0}\left(1 + \gamma \frac{A_0 - A_{corr}}{A_0}\right), \quad (10)$$

где  $i_{corr,0}$  - скорость коррозии исходной проволоки,  $\gamma$  — коэффициент влияния (определяется экспериментально), принимающий значения от 0,3 до 0,7.

Таблица 1 (начало)– Расчетные случаи повреждения коррозией каната К 1400 диаметром 15,7 мм (площадь сечения 150 мм<sup>2</sup>)

Случай	Схема	Кол-во проволок повр.	Расчетная площадь сечения каната при заданном проценте коррозии проволоки, мм <sup>2</sup>			Потеря сечения
			5%	10%	20%	
1		1	148,66	147,45	145,47	0,009-0,029
2		1	148,21	146,78	144,03	0,009-0,04
3		2	147,32	144,9	139,28	0,017-0,071

Таблица 1 (окончание)– Расчетные случаи повреждения коррозией каната К 1400 диаметром 15,7 мм (площадь сечения 150 мм<sup>2</sup>)

4		2	147,31	144,62	139,92	0,014-0,073
5		3	145,98	141,96	133,92	0,026-0,107
6		3	146,28	142,12	135,59	0,023-0,096
7		4	144,64	139,28	128,56	0,035-0,142
8		5	143,65	136,29	124,57	0,04-0,169
9		6	141,96	133,92	117,84	0,05-0,21
10		7	142,5	135	120	0,05-0,2

Произведен расчет надежности семипроволочного каната (К1400) с учетом развития коррозии по различным сценариям в сечении. В табл. 1 представлены некоторые схемы повреждения проволок каната коррозией. Результаты демонстрируют нелинейное снижение расчетной площади сечения каната по мере увеличения как количества корродированных проволок, так и глубины повреждения каждой из них.

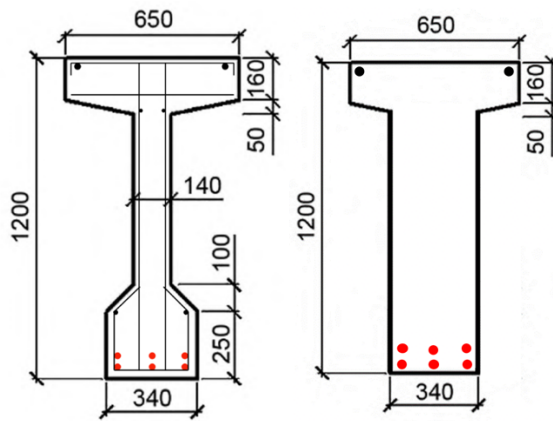


Рисунок 4 – Поперечные сечения подкрановой балки

На примере двутавровой подкрановой балки пролетом 12 метров (рис. 4) проведен анализ надежности с учетом коррозии и циклических нагрузок. Уровень надежности может опускаться ниже целевых значений уже через 15 лет эксплуатации, что требует дополнительных мер защиты или усиления конструкций.

Для расчета рассмотрены 3 схемы повреждения канатов коррозией в подкрановой балке (табл. 2).

Таблица 2 – Расчетные случаи повреждения канатов

Случай	Схема
1. Поврежден 1 крайний канат, 4 проволоки	
2. Повреждены 3 каната, в крайних повреждено по 4 проволоки из-за агрессивного воздействия с боковой и нижней сторон, в нижней центральной 2 проволоки	
3. Повреждены 5 канатов, в угловых нижних повреждены по 4 проволоки из-за агрессивного воздействия с боковой и нижней сторон, в верхних крайних канатах повреждены по 2 проволоки	

На рис. 5 представлены графики изменения несущей способности подкрановой балки при коррозии арматурных канатов для трех случаев, описанных в табл. 2. Показано, что при коррозии 3 и 5 канатов прочность по несущей способности не будет обеспечена на 26 и 19 годах соответственно.

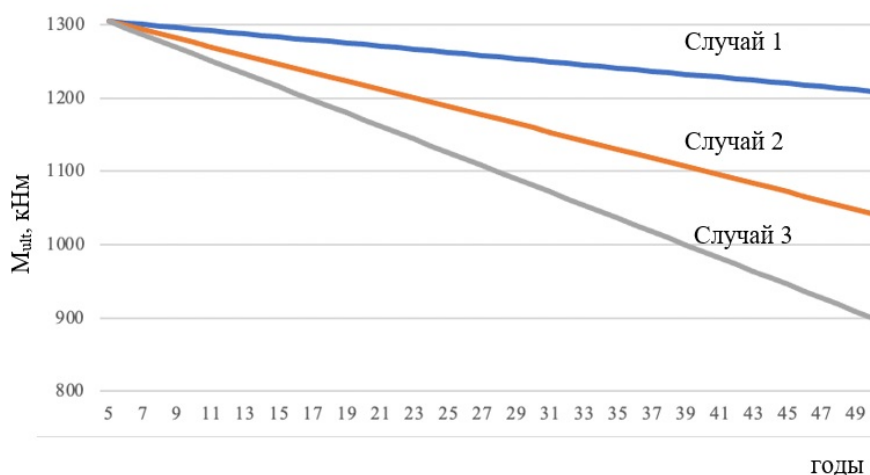


Рисунок 5 – Несущая способность подкрановой балки при случаях повреждения арматурных канатов по табл. 2

Получена зависимость уменьшения преднапряжения в зависимости от степени коррозии. Уменьшение предварительного напряжения в арматурном канате при коррозии можно описать следующей зависимостью:

$$\Delta\sigma(t) = P_0 \left( \frac{1}{A(t)} - \frac{1}{A_0} \right), \quad (11)$$

где  $\Delta\sigma(t)$  – потеря предварительного напряжения в момент времени  $t$ ;

$P_0$  – начальное предварительное усилие напряжения в канате;

$A_0$  – начальная площадь поперечного сечения каната;

$A(t)$  – остаточная площадь сечения каната, поврежденного коррозией в момент времени  $t$ .

Тогда потеря преднапряжения выражается следующим образом:

$$\Delta\sigma = P_0 \left( \frac{1}{A_0 - \sum_{i=1}^n A_{corr,i}} - \frac{1}{A_0} \right), \quad (12)$$

где  $n$  – количество проволок в канате.

Также потерю предварительного напряжения можно выразить через степень коррозии  $\eta(t)$ :

$$\Delta\sigma(t) = \frac{P_0}{A(t)} * \eta(t). \quad (13)$$

где  $\eta(t) = \left( 1 - \frac{A(t)}{A_0} \right)$ .

Блок-схема алгоритма расчета несущей способности подкрановой балки представлена на рис. 6.

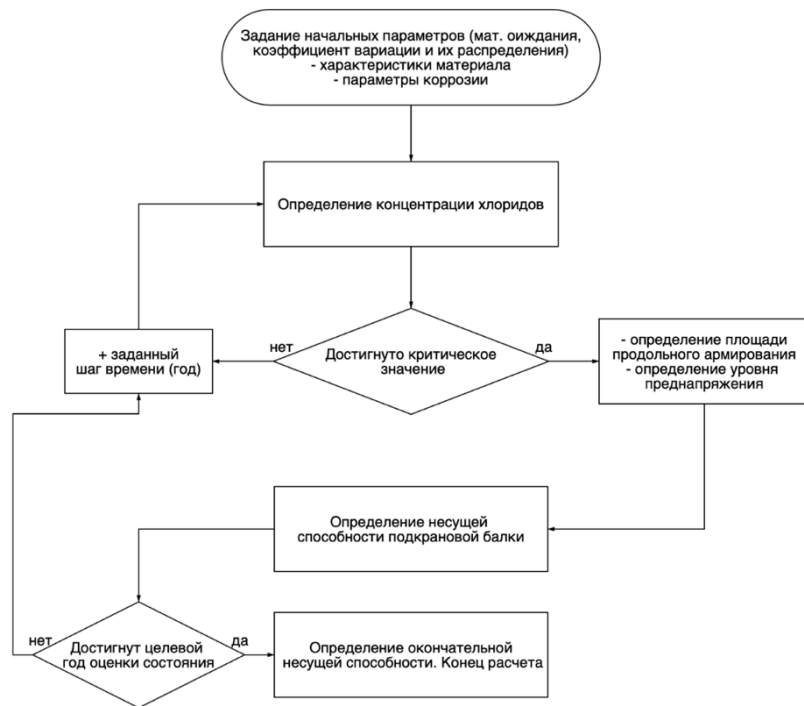


Рисунок 6 – Блок- схема алгоритма расчета несущей способности подкрановой балки

Для оценки вероятности коррозионного повреждения канатов предлагается следующая методика.

Модель инициации коррозии (на основе диффузии хлоридов):

$$t_{ин} = \frac{h^2}{4D} \left( erf^{-1} \left( 1 - \frac{C_{cr}}{C_0} \right) \right)^{-2} \quad (14)$$

где  $h$  - толщина защитного слоя бетона,  $D$  - коэффициент диффузии хлоридов,  $C_{cr}$  - критическая концентрация хлоридов.

Вероятность повреждения одного каната

$$P_1(t) = 1 - exp \left[ - \left( \frac{t - t_{ин}}{t_0} \right)^\gamma \right] \quad (15)$$

где  $t_0$  и  $\gamma$  - параметры распределения Вейбулла.

Случай независимого повреждения канатов:

$$P(t) = \begin{cases} P_1 = P_{кор.угл} \\ P_3 = P_{кор.угл}^2 \cdot P_{кор.лин} \\ P_5 = P_{кор.лин}^3 \cdot P_{кор.угл}^2 \end{cases} \quad (16)$$

где  $P_{кор.угл}$  – вероятность коррозии в угловом канате (воздействие агрессивной среды происходит с двух сторон);

$P_{кор.лин}$  – вероятность коррозии в канате, в котором воздействие агрессивной среды происходит только с одной стороны.

Случай коррелированного повреждения (с учетом пространственной зависимости):

$$P_n(t) = \int_0^\infty \Phi^k \left( \frac{\ln t - \mu - \sigma_{sp}\rho Z}{\sigma_{sp}\sqrt{1-\rho^2}} \right) dZ, \quad (17)$$

где  $\rho$  - коэффициент пространственной корреляции.

Получен сравнительный расчет индекса надежности подкрановой балки при коррозии 1, 3 и 5 канатов. Результаты расчетного случая воздействия коррозии на несколько арматурных канатов показаны на рис. 7.

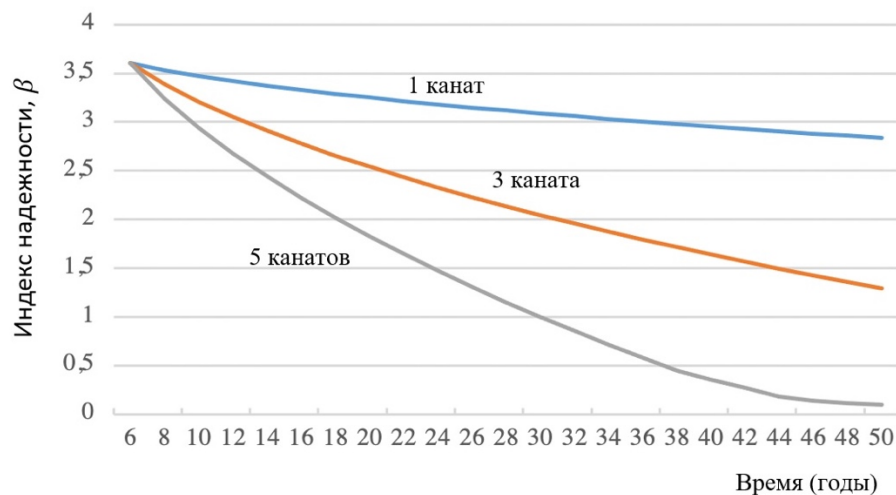


Рисунок 7 – Индекс надежности подкрановой балки при коррозии 1, 3 и 5 канатов

$$\beta = \frac{\overline{M_{crc}(t)} - \overline{M(t)}}{\sqrt{M_{crc}^2(t) + M^2(t)}}, \quad (18)$$

где  $\overline{M_{crc}(t)}$  и  $\overline{M(t)}$  – математические ожидания изгибающего момента, при котором достигается предельное значение раскрытия трещины, и изгибающего момента от внешней нагрузки;

$M_{crc}^2(t)$  и  $M^2(t)$  – дисперсии несущей способности и внешней нагрузки.

График  $M_{crc}$  для рассматриваемых случаев коррозии представлен на рис.8.

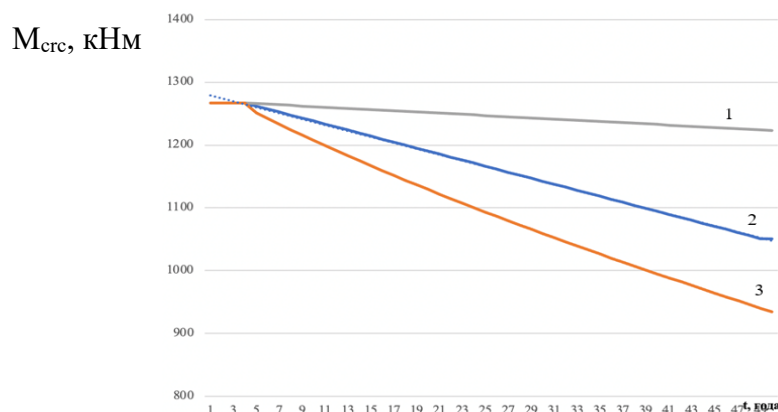


Рисунок 8 – Графики значений  $M_{crc}$  при расчетных случаях коррозии 1)1-го, 2) 3-х и 3) 5-ти канатов

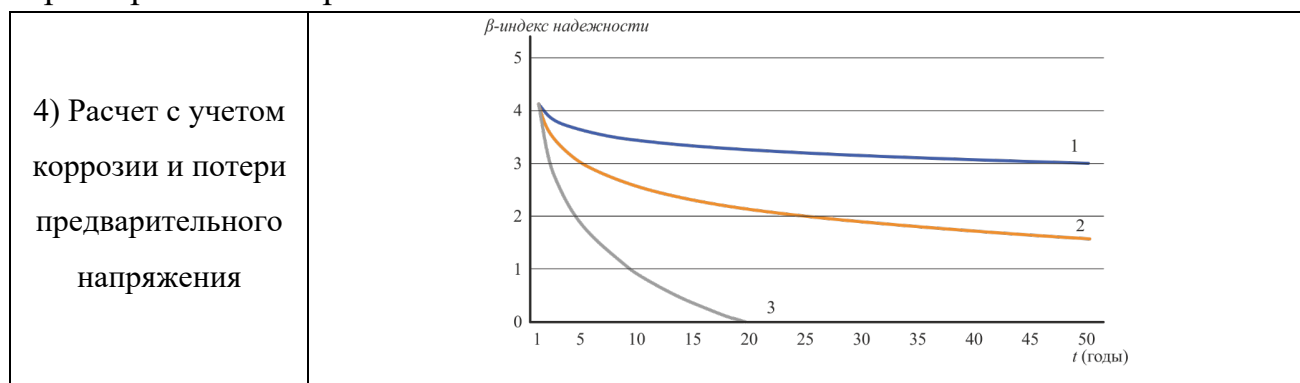
Определены индексы надежности для расчетных случаев по двум группам предельных состояний (табл. 3).

Надежность не обеспечена при коррозии 3-х канатов на уровне 20%, а, следовательно, возникает риск достижения предельного состояния. При коррозии 1-го каната подкрановая балка обладает достаточным резервом прочности для эксплуатации на всем жизненном цикле в 50 лет.

Таблица 3 (начало) - Расчетные индексы надежности по первой и второй группе предельных состояний преднапряженной подкрановой балки с учетом развития коррозии в арматурных канатах при нормальном распределении нагрузок и характеристик материалов

Первая группа	Индекс надежности
1) Расчет с учетом коррозии	
2) Расчет с учетом коррозии и потери предварительного напряжения	
Вторая группа	Индекс надежности
3) Расчет с учетом коррозии	

Таблица 3 (окончание) - Расчетные индексы надежности по первой и второй группе предельных состояний преднапряженной подкрановой балки с учетом развития коррозии в арматурных канатах при нормальном распределении нагрузок и характеристик материалов



В третьей главе проведены экспериментальные исследования по определению:

1. Влияния степени коррозии преднапряженного каната на прочность железобетонных балок при циклических нагрузках.
2. Зависимости прогиба балок от уровня коррозионного повреждения арматурного каната.
3. Остаточного запаса прочности балок с корродированным преднапряженным канатом.

Изготовлено 6 железобетонных балок прямоугольного сечения 100x150 мм длиной 1200 мм. Диаметр арматурного каната для 2-х групп по 3 образца составлял 9,6 мм, 12,5 мм. Для передачи усилия от натяжения закладывались закладные элементы (цанги). Также на этапе подготовки накладывались провода для корродирования в агрессивной среде каждые 200 мм (рис. 9 и 10). Для следующего этапа (проведение коррозии) была подготовлена емкость с водным 7% процентным раствором  $NaCl$  для проведения ускоренной коррозии.

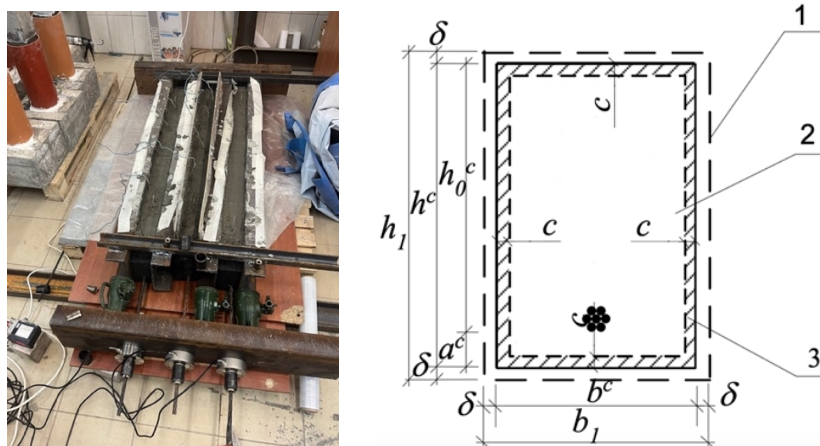


Рисунок 9 – Железобетонные балки-образцы

- 1-контуры поперечного сечения балки до коррозии; 2 – ненарушенный бетон;  
3 – контактный слой частично деградировавшего бетона

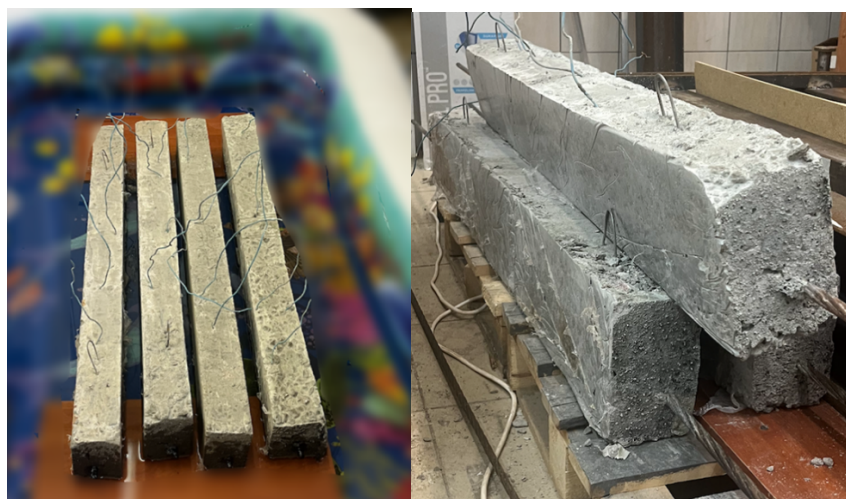


Рисунок 10 – а) ускоренное корродирование балок в емкости, б) готовые к испытаниям образцы

Образцы при испытании на циклическое нагружение показаны на рис. 11.



Рисунок 11 – Образцы при испытании на циклическое нагружение

Потеря предварительного напряжения напрямую зависит от степени коррозии арматурного каната. Для точных расчетов необходимо учитывать не только линейное уменьшение площади сечения, но и возможное ускорение коррозии при высоких уровнях повреждения (квадратичная составляющая).

Получены экспериментальные данные по изменению прогиба и деформации бетона железобетонных полноразмерных балок под воздействием агрессивной среды и нагрузки (табл.4).

Таблица 4 – Деформации экспериментальных образцов в зависимости от нагрузки

Серия	Шифр	$M_{ult}$ , кНм	$\Delta$ , %	Прогиб $f$ , мм	$\Delta$ , %	Прогиб при $0.7 M_u^{exp}$
0	Расчетный	150,36	-	15	-	-
1	КБ-1	141,19	93,9	12,32	82,13	5,12
1	БПК-1.1	98,84	65,17	10,12	67,46	7,16
1	БПК-1.2	65,42	43,5	8,47	56,46	7,66
2	КБ-2	131,54	87,48	9,89	65,93	4,96
2	БПК-2.1	105,61	70,24	7,23	48,2	5,83
2	БПК-2.2	71,6	47,62	8,29	55,26	6,71

\*\*Контрольная балка (КБ), Балка, подверженная коррозии (БПК)

Экспериментальными исследованиями установлены прочностные показатели железобетонных балок с коррозионными повреждениями в зоне чистого изгиба под действием различных уровней начальной нагрузки  $0,3-0,7M_u^{exp}$ .

Расчет несущей способности нормальных сечений железобетонных балок с коррозионными повреждениями по действующим нормативам, не предусматривающим воздействия коррозии, показал, что в большинстве случаев теоретические значения превышают экспериментальные данные, что не дает запаса прочности и не обеспечивает надежность конструкций. Расхождение составляет +13,7%.

По итогам ускоренной коррозии прочностные свойства арматурного каната снизились на 27,2-39,8% по сравнению с некорродированными образцами при целевом значении коррозии в 20%.

Первые трещины в балках, испытанных после воздействия агрессивной среды, появились на уровне  $0,16-0,3 M_u^{exp}$ . Несущая способность экспериментальных образцов после коррозии была снижена на 24,32-42,89%.

**В четвертой главе** выполнены исследования по аппроксимации численной модели железобетонной балки с преднапряжённым арматурным канатом при коррозии.

Работа бетона описывалась с помощью модели Menetrey-Willam. Триангулированная модель показана на рис. 12.

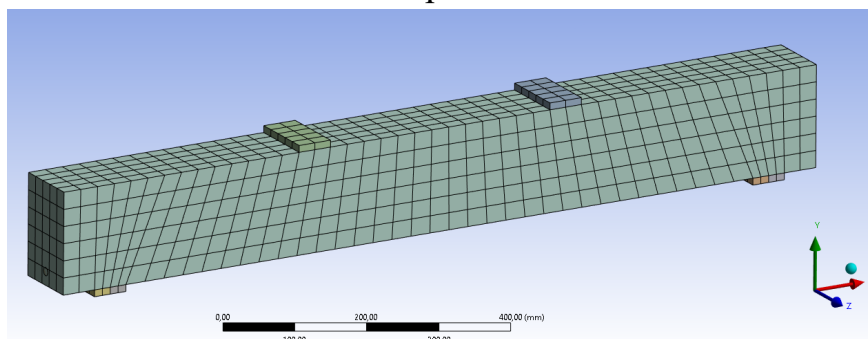


Рисунок 12 – Триангуляционная сеть модели

Графики изменения прогиба в зависимости от потерь предварительного напряжения показан на рис. 13.

Полученные результаты предельной нагрузки на подкрановую балку показывают, что при несимметричном нагружении предельная разрушающая нагрузка больше на 7%, что обуславливается включением в работу менее загруженных канатов в момент начала текучести стали и перехода в работу по балочной схеме.

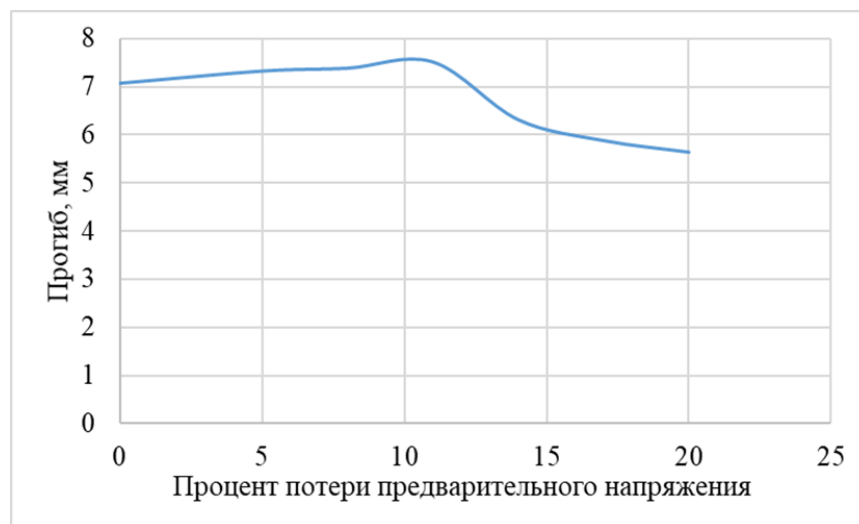


Рисунок 13 – График изменения прогиба балок в зависимости от процента потерь предварительного напряжения

На рис. 14 показаны зоны пластичности, образовавшиеся от действия нагрузки.

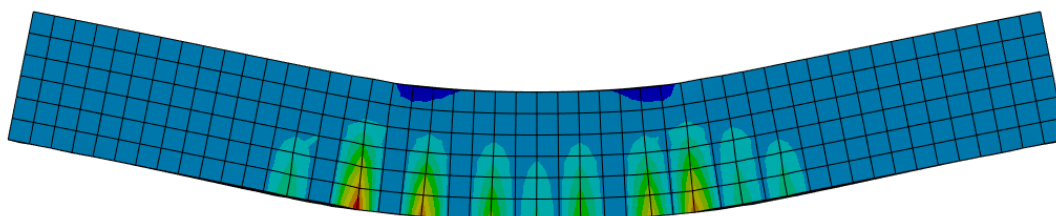


Рисунок 14 – Зоны пластичности экспериментального образца

Зоны пластичности расчетной модели совпадают с характером образования и распространения трещин в экспериментальных образцах, что свидетельствует о корректности численной модели для оценки несущей способности полноразмерной модели.

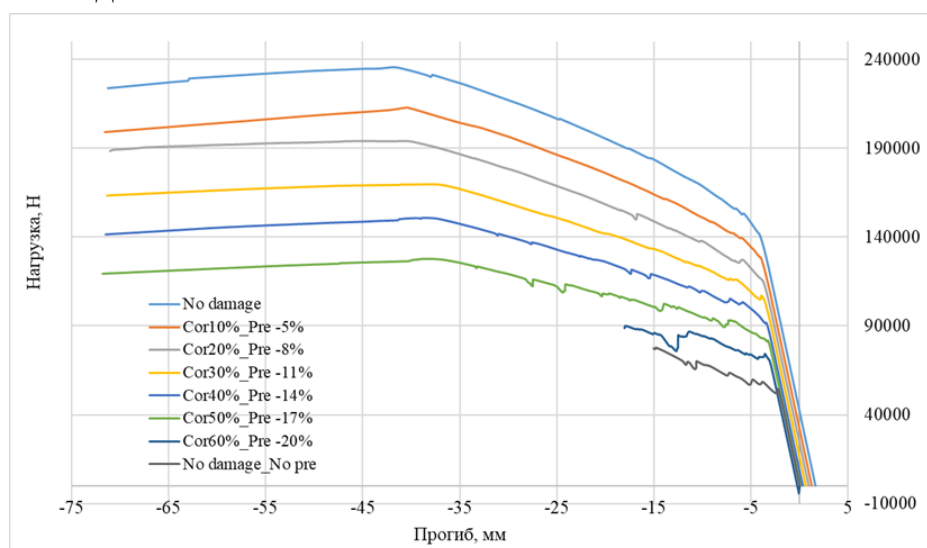


Рисунок 15 – График зависимости N-f различных моделей балок

Динамическая нагрузка принималась равной 85% от статического, и по результатам расчета максимальное значение динамического отклика балки

превысила на 6,5% при несимметричном и на 12% при симметричном нагружении значение статической нагрузки, что обуславливается возникновением инерционных эффектов. График зависимости  $N-f$  моделей балок представлен на рисунке 15.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенное исследование было направлено на решение научно-технической задачи по разработке метода оценки надежности железобетонных подкрановых балок, подверженных коррозии арматурных канатов в условиях циклических нагрузок. В ходе работы получены следующие результаты.

1. Проанализированы труды российских и зарубежных ученых по теме надежности изгибаемых железобетонных балочных элементов, выделены основные методы оценки надежности при действии коррозии и циклических нагрузок. Установлено, что существующие методы оценки коррозионного повреждения, разработанные для стержневой арматуры, не учитывают специфику многопроволочных канатов, где коррозия приводит к неравномерному перераспределению усилий между проволоками.

2. Разработана вероятностная модель деградации механических свойств семипроволочных канатов, учитывающая локализацию коррозионных повреждений в проволоках. Созданы математические модели, учитывающие коррозионные повреждения канатов и циклического нагружения, позволяющие прогнозировать остаточный ресурс конструкций. Произведена оценка потери предварительного напряжения в зависимости от степени и характера распространения коррозии в арматурном канате.

3. Месторасположение каната в сечении и уровень коррозии существенно влияют на значение потерь предварительного напряжения. Во всех случаях коррозия канатов уменьшила момент образования трещин.

4. Механизм разрушения корродированных многопроволочных канатов имеет принципиальные отличия от случая коррозии стержневой арматуры: при коррозии канатов наблюдается не только равномерное уменьшение сечения, но и критическое перераспределение напряжений между проволоками. Разработана модель влияния скорости (распространения) коррозии на возможность воспринимать циклические нагружения.

5. Показано, что коррозия арматурного каната приводит к значительному снижению индекса надежности с течением времени. Уровень надежности подкрановой балки может опускаться ниже проектных значений уже через 15 лет эксплуатации, что требует дополнительных мер защиты или усиления конструкций.

6. Целевые индексы надежности при варьировании параметров конструкции, такие как скорость коррозии, внешняя нагрузка и пр. позволяют сравнивать запас

эксплуатационного ресурса. При одинаковых параметрах конструкции разница в достижении предельного состояния по времени может составлять более 30 лет в зависимости от количества пораженных канатов и характера распространения коррозии в проволоках.

7. Экспериментально подтверждено, что сочетание коррозионного повреждения и циклических нагрузок приводит к ускоренному снижению несущей способности балок (до 35% по сравнению с некорродированными образцами).

8. В экспериментальном исследовании показано, что при увеличении процента коррозии характер разрушения менялся, так при коррозии каната 30% уровень предельной нагрузки снизился на 42%, при этом первые трещины появлялись уже при нагрузке 0,16 Mult.

9. Проведен сравнительный анализ полученных результатов экспериментальных исследований коррозионно-поврежденных преднапрягаемых железобетонных элементов и результатов численного моделирования в программном комплексе ANSYS. Сопоставление экспериментальных разрушающих нагрузок достаточную сходимость модели для инженерных расчётов и позволяет экстраполировать её на более высокие степени повреждения. Верификация на экспериментальных образцах показала сходимость 85,5 — 89,5%, что подтверждает применимость модели для оценки несущей способности полноразмерных преднапряжённых подкрановых балок.

### **Перспективы дальнейшего развития темы**

- Развитие методики расчета по влиянию коррозии на потери предварительного обжатия для других типов высокопрочной арматуры;
- Проведение экспериментов и численных расчетов по определению ползучести и усадки при коррозионных повреждениях бетона и арматуры в предварительно нажатых железобетонных изгибаемых элементах;
- Проведение исследований по оценке надежности предварительно напряженных железобетонных подкрановых балок при коррозии сжатой зоны сечения.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ**

*Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:*

1. Мацевич, Т. А. Функция надежности предварительно напряженной корродированной железобетонной балки при нелинейном распространении коррозии / Т. А. Мацевич, **И. Ф. Андреев** // Строительство и реконструкция. — 2023. — № 5 (109). — С. 45–52.

2. Мацеевич, Т. А. Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной корродированной арматуре железобетонных конструкций / Т. А. Мацеевич, **И. Ф. Андреев** // Вестник МГСУ. — 2022. — Т. 17. — № 11. — С. 1462–1470.

3. Мацеевич, Т. А. Оценка выносливости подкрановой балки при коррозии арматурных канатов / Т. А. Мацеевич, **И. Ф. Андреев** // Строительство и реконструкция. — 2025. — № 4. — С. 82–90.

4. **Андреев И.Ф.** Численное моделирование коррозии в преднапряженном железобетонном изгибаемом элементе // Современное строительство и архитектура. – 2026. – №2 (69).

*Статья, опубликованная в журнале, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus:*

5. Matseevich, T. Reliability crane beam probabilistic analysis of under corrosion conditions / T. Matseevich, **I. Andreev** // AIP Conference Proceedings. - 2026. - Vol. 3247, no. 1. - P. 040006.

*Статьи, опубликованные в других научных изданиях:*

6. **Андреев И.Ф.**, Мацеевич Т.А. Надежность арматурного каната К-7 при корреляции коррозии между проволоками // В сборнике: Инновации в строительстве. Материалы международной научно-практической конференции. Брянск. – 2024. – С. 213-216.

7. Мацеевич Т.А., **Андреев И.Ф.** Факторы, оказывающие влияющие на надежность железобетонных балок// В сборнике: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Курск. – 2023. – С. 105-111.

**Андреев Илья Федорович**

## **НАДЕЖНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК ПРИ КОРРОЗИИ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения  
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

---

Подписано в печать

26.03.2026 г.

Усл. печ. л. – 1,5

Заказ № М 2.13-1

Формат 60x90/16

Тираж 80 экз.

---

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий»

127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, дом 46, корп.2.