

Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, И.Ф. АНДРЕЕВ¹

¹Национальный исследовательский московский государственный строительный университет,
Москва, Россия

ОЦЕНКА ВЫНОСЛИВОСТИ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ ПРИ КОРРОЗИИ АРМАТУРНЫХ КАНАТОВ

Аннотация. В статье исследуется влияние коррозии арматурных канатов на усталостную выносливость железобетонных подкрановых балок типа БК 12-7 К7Т. Рассмотрены основные механизмы коррозии, включая хлоридную, карбонизацию бетона и гальваническую коррозию, которые наиболее актуальны для промышленных сооружений. Предложена методика оценки остаточного ресурса балок с учетом потери сечения арматурных канатов, дополненная вероятностной моделью плотности тока коррозии, что повышает точность прогнозирования. Проведены расчеты числа циклов до разрушения для различных степеней коррозии (5%, 10%, 20%), показавшие, что при 20% коррозии ресурс балки сокращается в 2,5 раза. Результаты исследования демонстрируют значительное снижение усталостной долговечности конструкции при увеличении степени коррозии, что подчеркивает необходимость учета коррозионных факторов при проектировании и эксплуатации подкрановых балок. Методика может быть полезна для инженеров и специалистов, занимающихся оценкой состояния и ремонтом промышленных сооружений.

Ключевые слова: подкрановая балка, коррозия, арматурный канат, выносливость, железобетонные конструкции.

T.A. MATSEEVICH¹, I.F. ANDREEV¹

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ASSESSMENT OF THE ENDURANCE OF A CRANE BEAM IN CORROSION OF REINFORCEMENT ROPES

Abstract. The article examines the effect of corrosion in prestressing strands on the fatigue endurance of reinforced concrete crane beams of type BK 12-7 K7T. The main corrosion mechanisms are discussed, including chloride-induced corrosion, carbonation of concrete, and galvanic corrosion, which are most relevant for industrial structures. A methodology is proposed for assessing the residual service life of beams, taking into account the loss of cross-sectional area in the prestressing strands, supplemented by a probabilistic model of corrosion current density, which improves prediction accuracy. Calculations of the number of cycles to failure were performed for different degrees of corrosion (5%, 10%, 20%), showing that at 20% corrosion, the beam's service life decreases by 2.5 times. The study results demonstrate a significant reduction in fatigue durability with increasing corrosion levels, highlighting the need to account for corrosion factors in the design and operation of crane beams. The proposed methodology can be useful for engineers and specialists involved in condition assessment and repair of industrial structures.

Keywords: overhead crane beam, corrosion, reinforcing rope, endurance, reinforced concrete structures.

1. Введение

Железобетонные подкрановые балки являются критически важными элементами промышленных сооружений, подверженными многократным динамическим нагрузкам и агрессивным воздействиям окружающей среды. Коррозия арматурных канатов значительно снижает их несущую способность и усталостную долговечность [1, 2]. Актуальность данной проблемы подтверждается отказами таких конструкций, что требует разработки новых методов оценки их остаточного ресурса.

Надежность железобетонных подкрановых балок при коррозионном повреждении арматурных канатов требует комплексного учета пространственно-временных факторов деградации. Как показано в работе [3], вероятностные модели, учитывающие неоднородность распределения коррозии и время до первого ремонта, позволяют существенно повысить точность прогнозирования остаточного ресурса конструкций. Работа [4] развивает этот подход, предлагая систему критериев оценки надежности, включая анализ микро- и макроповреждений, что особенно актуально для преднапряженных элементов. В случае многопроволочных канатов типа К1400 [5], ключевым фактором становится корреляция коррозии между отдельными проволоками: локальные повреждения приводят к перераспределению напряжений и прогрессирующему снижению несущей способности даже при малых степенях коррозии (5-10%).

Современные подходы к оценке надежности железобетонных конструкций требуют учета синергетического эффекта от совместного действия механических нагрузок и коррозионных процессов. Как демонстрируют работа [8], численное моделирование работы конструкций в агрессивных средах позволяет выявить критические зоны ускоренной деградации, где коррозия потенцирует развитие трещин при циклических нагрузках. Особое значение это имеет для подкрановых балок, испытывающих динамические воздействия. Методика оценки остаточного срока службы, предложенная в работе [9], объединяет данные мониторинга коррозионных повреждений с прогнозными моделями, что особенно важно для перекрытий промышленных зданий, где локальные повреждения арматуры снижают общий ресурс конструкции на 30-40% даже при визуально незначительных дефектах. Фундаментальные принципы структурной надежности, изложенные в [10], систематизируют эти подходы, подчеркивая необходимость вероятностного анализа для учета неопределенностей в параметрах коррозии и нагрузок. Комбинация этих методов позволяет разрабатывать адаптивные стратегии эксплуатации, минимизирующие риски внезапных отказов.

Агрессивные среды оказывают комплексное негативное воздействие на железобетонные конструкции, значительно ускоряя процессы коррозии и снижая их долговечность. Как отмечено в работе [11], одновременное воздействие механических нагрузок и агрессивных факторов приводит к синергетическому эффекту, при котором прочность бетона и арматуры снижается на 20-30% быстрее, чем при изолированном влиянии этих факторов [12]. Особенно критично это проявляется в мостовых конструкциях [13], где вероятностное моделирование позволяет учесть вариабельность агрессивных воздействий и спрогнозировать зоны наибольшего риска коррозионных повреждений.

Случаи развития коррозии в подкрановой балке. Коррозия арматуры в железобетонных конструкциях развивается вследствие нескольких механизмов.

1. Хлоридная коррозия (доминирующий механизм в промышленных зданиях): проникновение ионов Cl^- из антигололедных реагентов или морской среды, локализация повреждений в зоне растяжения балок.

2. Карбонизация бетона: Реакция CO_2 с гидроксидом кальция (рН снижается до 8-9).

3. Гальваническая коррозия возникает при контакте разнородных металлов. Представляет особую опасность для контактных зон стальных канатов и нержавеющей анкеров.

Согласно работам [6, 7], 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} . i_{corr} является измерением общего тока, протекающего в потенциостатически контролируемых арматурных стержнях, и, следовательно, измеряются только средние свойства. Поэтому i_{corr} является измерением равномерной или общей коррозии, которая представляет собой приблизительно равномерную потерю металла по всей открытой поверхности арматурной проволоки. Диаметр корродирующего арматурного стержня в момент времени t может быть оценен непосредственно по i_{corr} как

$$D(t) = D_0 - \int r_c dt = D_0 - 0.0232 \int i_{corr} dt. \quad (1)$$

где D_0 первоначальный диаметр арматуры (мм), коэффициент 0.0232 учитывает процесс распространения коррозии со всех сторон арматуры, а $\int r_c dt$ представляет собой рост коррозии в данный момент времени t .

Оценка выносливости нормальных сечений. Кривая усталости, известная также как кривая Веллера, представляет собой фундаментальную зависимость между величиной приложенных напряжений и количеством циклов нагружения, приводящих к разрушению материала. Эта зависимость устанавливается экспериментальным путем и служит основой для оценки усталостной долговечности конструкционных материалов.

Наиболее распространенным методом определения кривой усталости являются испытания на чистый изгиб при симметричном цикле нагружения. Выбор данного вида нагружения обусловлен двумя факторами:

1. Симметричный цикл является наиболее опасным для большинства конструкционных материалов.
2. Экспериментальная реализация такого нагружения технически проще по сравнению с другими видами циклов.

Испытания проводят по следующей методике:

1. К первому образцу прикладывают нагрузку, заведомо превышающей предел выносливости, но ниже предела прочности материала.
2. Для последующих образцов максимальное напряжение постепенно уменьшают.
3. Специальный счетчик фиксирует количество циклов до разрушения каждого образца.

По полученным данным строят график зависимости числа циклов N от максимального напряжения цикла.

Анализ кривой усталости позволяет выявить несколько важных закономерностей:

1. При уменьшении амплитуды напряжений количество циклов до разрушения возрастает по степенному закону
2. Образцы, выдержавшие 10^7 циклов, могут работать неограниченно долго при данном уровне напряжений
3. Для цветных металлов кривая не имеет четкого предела выносливости, поэтому вводится понятие условного предела (при $N=10^8$ циклов)

Пример кривой Веллера представлен на рисунке 1.

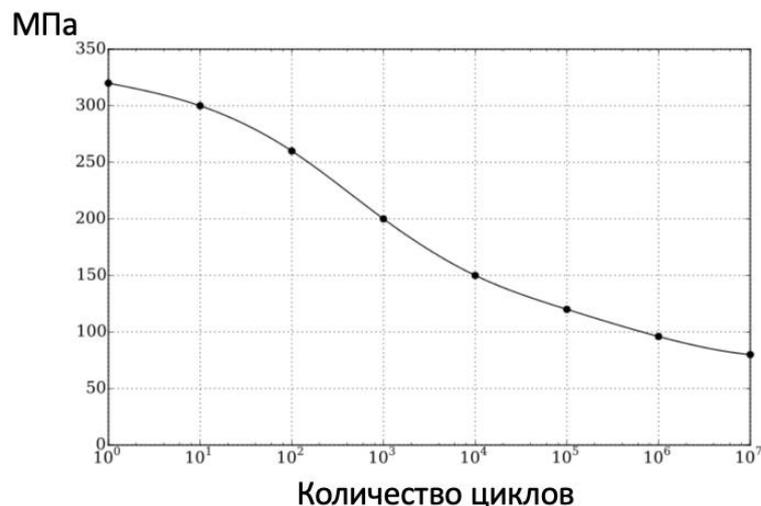


Рисунок 1 – Кривая Веллера для железобетонной конструкции

2. Модели и методы

Перейдем к модели распространения коррозии в арматурном канате 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.

Чтобы разобраться с i_{corr} после начала коррозии, многие исследователи просто рассматривали его как постоянную величину на протяжении всего срока службы конструкции. Однако это предположение может быть неправдоподобным, поскольку как теоретические, так и экспериментальные результаты указывают на то, что i_{corr} увеличивается со временем. Следует подчеркнуть, что для установления реалистичной зависимости между i_{corr} и временем необходимо провести множество измерений в разные моменты времени. Математическое выражение этой изменяющейся во времени модели плотности тока коррозии имеет вид:

$$i_{corr} = a(\Delta t)^\gamma = a(t - t_i)^\gamma, \quad t \geq t_i, \quad (3)$$

где α и γ – параметры модели. Обратим внимание, что, когда значения i_{corr} измеряются в момент времени t_i , $i=1, \dots, n$, α и γ могут быть определены по этим значениям с помощью нелинейного регрессионного анализа. Эти измеренные данные также могут быть использованы для оценки неопределенности в α и γ :

$$A(t) = \begin{cases} A_0 - \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} \left(\frac{0.0232\alpha}{\gamma + 1} (t - t_n)^{\gamma+1} \right)^2, & t \geq t_n \\ A_0, & t \leq t_n \end{cases} \quad (4)$$

Плотность тока коррозии, i_{corr} , представляет собой "мгновенное" значение, поскольку относится к конкретному моменту, в который регистрируется результат измерения. Ее значением до начала коррозии обычно пренебрегают.

Потеря преднапряжения связана с уменьшением площади сечения и релаксацией напряжений в поврежденных проволоках. Формула для оценки потери преднапряжения:

$$\Delta P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{A(t)}{A_0}\right) + \Delta P_{relax} \quad (5)$$

где P_0 — начальное преднапряжение в канате, $A(t)$ — текущая площадь сечения каната, ΔP_{relax} — дополнительная потеря из-за релаксации напряжений (обычно составляет 5–10% от P_0 при значительной коррозии).

Случаи развития коррозии в растянутой зоне балки представлены на рисунке 2.

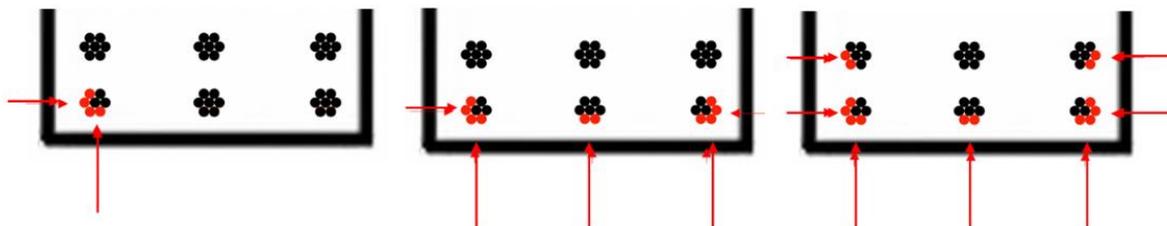


Рисунок 2 – Схемы развития коррозии в канатах в растянутой зоне подкрановой балки

Расчетные показатели потери сечения представлены в таблице 1.

Таблица 1– Сценарии развития коррозии в арматурном канате.

Случай	Схема	Кол-во повр. проволок	Расчетная площадь сечения каната при заданном проценте коррозии проволоки, мм ²			Потеря преднапряжения, %
			5%	10%	20%	
1		2	147,32	144,9	139,28	0,017, 0,044, 0,071
2		44	144,64	139,28	128,56	0,035, 0,0885, 0,142

3. Результаты исследования и их анализ

Расчет на выносливость произведен для подкрановой балки типа БК 12-7 К7Т. Размеры и сечение представлены на рисунке 3.

На предварительном этапе была заложена площадь поперечного сечения в растянутой зоне $A_{sp} = 900 \text{ мм}^2$ ($6\text{Ø}15,7 \text{ К } 1400$), в сжатой зоне $A'_{sp} = 300 \text{ мм}^2$ ($2\text{Ø}15,7 \text{ К } 1400$).

Для расчета на выносливость оценим напряжения в бетоне и арматурных канатах от внешней нагрузки с учетом предварительного напряжения [14].

$$\sigma_b = \sigma_{bp} \pm \frac{M * y}{I_{red}} \quad (6)$$

При отсутствии крановой нагрузки:

$$\sigma_b = 3,67 - \frac{179,7 * 10^6 * 768}{87198 * 10^6} = 2,09 \text{ МПа.} \quad (7)$$

$$\sigma_b = -0,3 + \frac{179,7 * 10^6 * 632}{87198 * 10^6} = 1,01 \text{ МПа.}$$

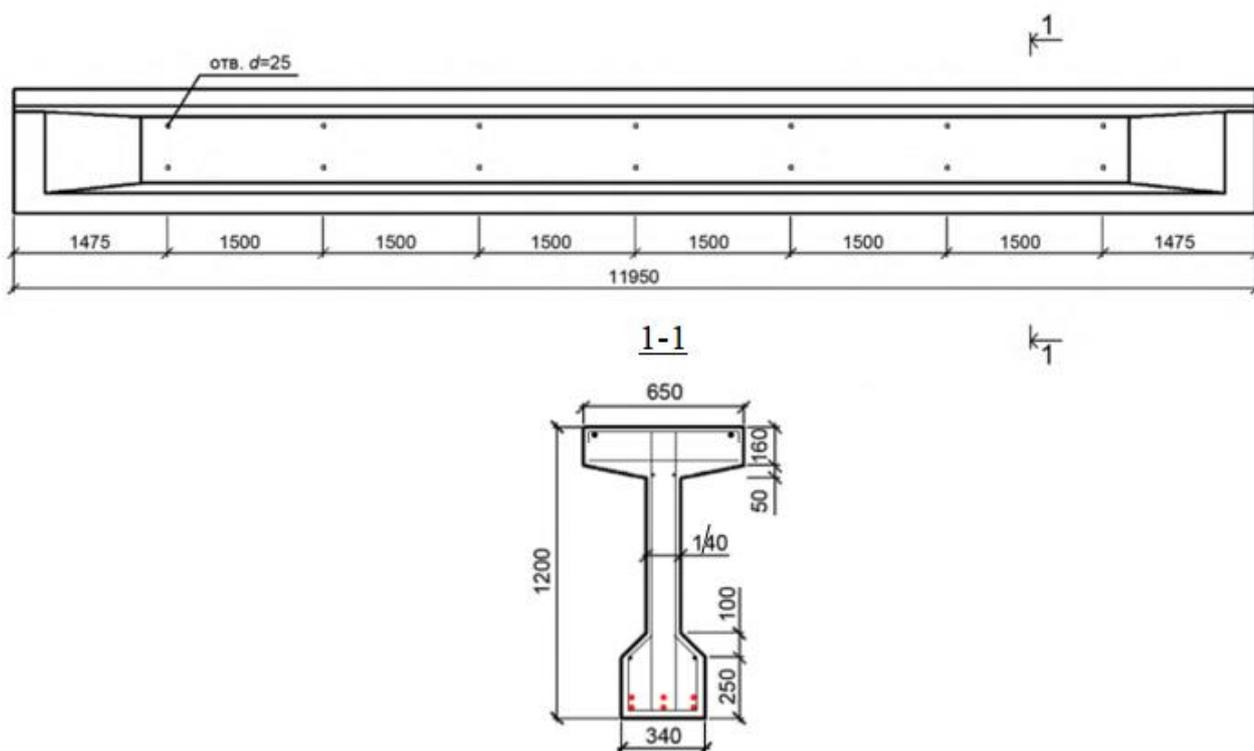


Рисунок 3 – Размеры и сечение подкрановой балки

При действии крановой нагрузки:

$$\sigma_b = 3,67 - \frac{555,4 \cdot 10^6 \cdot 768}{87198 \cdot 10^6} = -1,21 \text{ МПа} \quad (8)$$

$$\sigma_b = -0,3 + \frac{555,4 \cdot 10^6 \cdot 632}{87198 \cdot 10^6} = 3,73 \text{ МПа}$$

Для арматурных канатов:

$$\sigma_s = \sigma_{sp} \pm \alpha' \frac{M * y_{sp}}{I_{red}} \quad (9)$$

Тогда

$$\sigma_{sp,max} = 892 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{sp,min} = 641 \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{sp} = \sigma_{sp,max} - \sigma_{sp,min} = 251 \text{ МПа}$$

Оценку числа циклов проведем по методике, предложенной в [15, 16].

$$\Delta\sigma_R = 175 \text{ МПа} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N} \right)^{1/5} \quad (10)$$

Тогда получаем, что $N = 2 \cdot 10^6 \cdot (175/251)^5 \approx 3.2 \cdot 10^5$ циклов.

С учетом развития коррозии в арматурных канатах при 10% и 20% для расчетного случая поражения 3-х канатов, получаем следующие значения:

10% коррозии: $A_{sp} = 80,6 \text{ мм}^2$, $\Delta\sigma_{sp} = 310 \text{ МПа} \rightarrow N \approx 1,2 \cdot 10^5$ циклов

20% коррозии: $A_{sp} = 71,6 \text{ мм}^2$, $\Delta\sigma_{sp} = 349 \text{ МПа} \rightarrow N \approx 6,5 \cdot 10^4$ циклов

Проведенные расчеты и анализ данных позволили выявить закономерности влияния коррозии на усталостную выносливость подкрановых балок типа БК 12-7 К7Т.

1. При потере сечения арматурных канатов на 5%, 10% и 20% наблюдалось прогрессирующее снижение их несущей способности. В частности, при 20% коррозии площадь поперечного сечения канатов уменьшилась с 147,32 мм² до 139,28 мм² (случай 1) и с 144,64 мм² до 128,56 мм² (случай 2), что привело к значительному перераспределению напряжений в конструкции.

2. Расчеты показали, что максимальные напряжения в арматурных канатах при коррозии 20% достигли 892 МПа. При этом размах напряжений ($\Delta\sigma$) составил 251 МПа, что существенно снижает усталостный ресурс конструкции.

3. Использование модифицированной кривой Веллера для поврежденных коррозией канатов позволило установить, что при 10% коррозии число циклов до разрушения сократилось с $3,2 \cdot 10^5$ до $1,8 \cdot 10^5$, а при 20% — до $1,2 \cdot 10^5$. Это свидетельствует о нелинейном характере снижения выносливости при увеличении степени коррозионного повреждения.

5. Полученные значения выносливости (циклов) для корродированных балок не учитываются в существующих нормативных документах. Это указывает на необходимость учета дополнительных коэффициентов запаса при проектировании подкрановых конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах.

4. Заключение

1. Установлено, что коррозия приводит не только к уменьшению сечения проволок, но и к перераспределению усилий между ними, что снижает несущую способность на 10–30% при потере сечения 5–15%. Коррозия канатов сокращает выносливость балки: при 10% потере сечения число циклов падает с $3,2 \cdot 10^5$ до $1,8 \cdot 10^5$, при 20% — до $1,2 \cdot 10^5$ циклов. Также существенное влияние оказывает характер распространения и скорость коррозии, которая зависит от плотности тока коррозии.

2. Предложена вероятностная модель, учитывающая скорость коррозии и ее влияние на преднапряжение. Показано, что коррозия увеличивает суммарные потери преднапряжения на 5–20% в зависимости от агрессивности среды. Наибольший вклад вносят уменьшение площади сечения арматуры, а также из-за релаксации напряжений в поврежденных проволоках.

3. Результаты работы позволяют прогнозировать выносливость подкрановых балок, чтобы оптимизировать методы их усиления с учетом степени коррозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 1 (99). С. 89-98.
2. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Развитие математических моделей, описывающих процессы коррозии в бетонных и железобетонных конструкциях // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2020. №3. С. 85-93.
3. Stewart M. G., & Mullard J. A. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures // *Engineering Structures*. 2007. 29(7), 1457-1464.
4. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 1. № 1. С. 5-18.
5. 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.
6. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R. *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair* (2nd ed.). Wiley-VCH. 2013.
7. Tuutti K. *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI). 1982.
8. Селяев В.П., Селяев П.В., Кечуткина Е.Л., Бабушкина Д.Р., Грязнов С.Ю. Моделирование работы железобетонных конструкций с учетом совместного действия механических нагрузок и агрессивных сред // *Эксперт: теория и практика*. 2021. № 1(10). С. 19-24.
9. Смоляго Г.А., Демин В.О., Фролов Н.В., Дрокин С.В. Оценка остаточного срока службы железобетонных перекрытий с коррозионными повреждениями // *Строительство и архитектура*. 2023. Т. 11. №3. С. 17.
10. Melchers R. E. *Structural Reliability Analysis and Prediction* (3rd ed.). Wiley. 2018.
11. Колчунов В.И., Андросова Н.Б. Прочность корродирующего бетона при одновременном проявлении силовых и средовых воздействий // *Строительство и реконструкция*. 2013. № 5 (49). С. 3-9.
12. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 2. С.19-26.
13. Овчинников И.И., Чэнь Т., Овчинников И.Г. Вероятностное моделирование поведения армированных мостовых конструкций в агрессивных условиях // *Транспортные сооружения*. 2017. Т. 4. № 4. С. 3.
14. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».
15. Травуш В.И., Волков Ю.С. Вопросы применения Еврокодов в строительном проектировании в РФ // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2021;30(3):117-123.
16. Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings, CEN.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability Analysis of Reinforced Concrete Slabs with Corroded Reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2022. 1(99), 89-98. (in Russian)
2. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Krasilnikova I.A. (2020). Development of Mathematical Models Describing Corrosion Processes in Concrete and Reinforced Concrete Structures. *Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Structures. Technologies*. 2020. 3, 85-93. (in Russian)
3. Stewart, M. G., & Mullard, J. A. (2007). Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures. *Engineering Structures*. 2007. 29(7), 1457-1464.
4. Tamrazyan A.G. Methodology for Analysis and Reliability Assessment of Reinforced Concrete Structures' Condition and Service Life Prediction. *Reinforced Concrete Structures*. 2023. 1(1), 5-18. (in Russian)
5. Andreev I.F., Matseevich T.A. Reliability of K-7 Reinforcement Rope with Corrosion Correlation Between Wires. In: *Innovations in Construction: Proceedings of International Scientific-Practical Conference*. Bryansk, 2024. pp. 213-216. (in Russian)
6. Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R. *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair* (2nd ed.). Wiley-VCH. 2013.
7. Tuutti K. *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI). 1982.
8. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Kechutkina E.L., Babushkina D.R., Gryaznov S.Yu. Modeling of Reinforced Concrete Structures Performance Considering Combined Mechanical Loads and Aggressive Environments. *Expert: Theory and Practice*. 2021. 1(10), 19-24. (in Russian)

9. Smolyago G.A., Demin V.O., Frolov N.V., Drokin S.V. Residual Service Life Assessment of Reinforced Concrete Floors with Corrosion Damage. *Construction and Architecture*. 2023. 11(3), Pp. 17. (in Russian)
10. Melchers R. E. Structural Reliability Analysis and Prediction (3rd ed.). Wiley. 2018.
11. Kolchunov V.I., Androsova N.B. Strength of Corroding Concrete Under Simultaneous Mechanical and Environmental Impacts. *Building and Reconstruction*. 2013. 5(49), Pp. 3-9. (in Russian)
12. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Industrial and civil engineering*. 2019. No. 2. P. 19-26.
13. Ovchinnikov I.I., Chen T., Ovchinnikov I.G. Probabilistic Modeling of Reinforced Bridge Structures Behavior in Aggressive Conditions. *Transport Structures*. 2017. 4(4), Pp. 3. (in Russian)
14. Russian Federation. (2018). SP 63.13330.2018 "SNiP 52-01-2003 Concrete and Reinforced Concrete Structures. Basic Provisions". (in Russian)
15. Travush V.I., Volkov Yu.S. Issues of Eurocodes Application in Construction Design in Russian Federation. *Bulletin of Scientific Research Center "Construction"*. 2021. 30(3), Pp. 117-123. (in Russian)
16. European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for Buildings.

Информация об авторах

Мацевич Татьяна Анатольевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»: г. Москва, Россия, д-р ф.-м. наук, профессор.

E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

Андреев Илья Федорович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»: г. Москва, Россия, аспирант.

E-mail: yfyfyt@gmail.com

Information about authors

Matseevich Tatiana A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor.

E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

Andreev Ilya F.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Postgraduate Student.

E-mail: yfyfyt@gmail.com

Статья поступила в редакцию 21.06.2025
Одобрена после рецензирования 01.07.2025
Принята к публикации 11.08.2025

The article was submitted 21.06.2025
Approved after reviewing 01.07.2025
Accepted for publication 11.08.2025