

Т.А. МАЦЕЕВИЧ<sup>1</sup>, И.Ф. АНДРЕЕВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

## ФУНКЦИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ КОРРОДИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ КОРРОЗИИ

*Аннотация.* В статье рассматривается функция предельного состояния в контексте анализа надежности корродированных балок. Обсуждаются методы определения предельной нагрузки для балок, подверженных коррозии. Рассматриваются различные подходы к определению функции предельного состояния, в том числе базирующиеся на статистических данных о коррозии и моделировании напряжений в железобетонной балке. Общая модель оценки надежности железобетонных конструкций должна включать распространение коррозии. Большинство предыдущих исследований были сосредоточены на проблемах одномерной диффузии с предполагаемой постоянной скоростью коррозии. Нелинейная модель скорости коррозии, в отличие от линейных моделей, рассматривает плотность тока коррозии не постоянной в течение срока службы железобетонной конструкции. Разработан подход к анализу надежности вместе с нелинейной моделью роста коррозии. В данной статье рассмотрены основные проблемы, связанные с надежностью при нелинейной модели коррозии преднапряженного арматурного каната железобетонных балок. Представлена функция уменьшения диаметра стержня арматуры от времени. Проведен анализ чувствительности для определения влияния параметров роста коррозии на индекс надежности железобетонной тавровой балки. Нелинейная модель роста коррозии вместе с другими соответствующими вероятностными моделями, используемыми для описания случайных переменных, была применена для анализа надежности железобетонной подкрановой балки. Выражение плотности тока коррозии показывает, что скорость коррозии увеличивается экспоненциально при увеличении значения расчетного параметра модели. Для дальнейшей оценки влияния предложенной модели роста коррозии по времени на надежность железобетонной балки рассматриваются два конкретных случая. Первый - с фиксированной плотностью тока коррозии, второй - с фиксированным ростом коррозии в заданное время.

*Ключевые слова:* функция надежности, плотность тока, нелинейное распространение коррозии, надежность, предельное состояние.

Т.А. MATSEEVICH<sup>1</sup>, I.F. ANDREEV<sup>1</sup><sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

## RELIABILITY FUNCTION OF A PRESTRESSED CORRODED REINFORCED CONCRETE BEAM WITH NONLINEAR CORROSION PROPAGATION

*Abstract.* The paper considers the limit state function in the context of reliability analysis of corroded beams. Methods for determining the ultimate load limit for corroded beams are discussed. Various approaches to the determination of the limit state function are considered, including those based on statistical data on corrosion and modelling of stresses in a reinforced concrete beam. A general reliability assessment model for reinforced concrete structures should include corrosion propagation. Most previous studies have focused on one-dimensional diffusion problems with an assumed constant corrosion rate. A nonlinear corrosion rate model, unlike linear models, considers the corrosion current density not constant over the service life of a reinforced concrete structure. An approach to reliability analysis together with a nonlinear corrosion growth model is developed. In this paper, the main problems related to reliability under a nonlinear model of prestressed reinforcement rope corrosion of reinforced concrete beams are discussed. A function for the reduction of reinforcing

bar diameter from time is presented. Sensitivity analysis is performed to determine the effect of corrosion growth parameters on the reliability index of reinforced concrete T-beam. The nonlinear corrosion growth model, together with other relevant probabilistic models used to describe random variables, was applied to analyze the reliability of a reinforced concrete crane girder. The expression of corrosion current density shows that the corrosion rate increases exponentially as the value of the design parameter of the model increases. To further evaluate the effect of the proposed time corrosion growth model on the reliability of reinforced concrete beam, two specific cases are considered. The first one is with fixed corrosion current density, and the second one is with fixed corrosion growth at a given time.

**Keywords:** reliability function, current density, non-linear corrosion propagation, reliability, limit state.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов С.И. Развитие теории конструктивной безопасности объектов в условиях коррозионных воздействий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 44-46.
2. Tamrazyan A.G., Koroteev D.D. [Assessment of the durability of corrosion-damaged prefabricated reinforced concrete structures](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012009) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1687. Pp. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012009>.
3. Смоляго Г.А., Дронов В.И., Дронов А.В., Меркулов С.И. Изучение влияния дефектов железобетонных конструкций на развитие коррозионных процессов арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 12. С. 49-51. [https://doi.org/10.12737/article\\_5c506209065dd6.02007715](https://doi.org/10.12737/article_5c506209065dd6.02007715).
4. Nogueira K.G., Leonel E.D., Coda H.B. Reliability algorithms for assessing the durability of reinforced concrete structures // Journal of IBRACON Structures and Materials. 2012. Vol. 5. No. 4. Pp. 440-450.
5. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89-98. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98>.
6. Меркулов С.И., Дворников В.М., Пахомова Е.Г. Работоспособность железобетона в условиях воздействия агрессивных сред // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. 2006. № 10. С. 10.
7. Ягупов Б.А., Мигаль Р.Е. К вопросу оценки несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций, поврежденных коррозией // Бетон и железобетон. 2007. № 3. С. 28-30.
8. 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.
9. Ting S.C., Nowak A.S. Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams. ACI Structural Journal, 88(3), 1991.
10. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 4(80). Pp. 128-137. <https://doi.org/10.18720/MCE.80.12>.
11. Browne R.D. Mechanisms of Corrosion of Steel in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structure. ACISP-65, U.S. Detroit.
12. Andrade C. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements. *Cement and Concrete Research*. 1993. Vol. 23. Pp. 724-742. doi:10.1016/0008-8846(93)90023-3.
13. Мацеевич Т.А., Андреев И.Ф. Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной корродированной арматуре железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1462-1470. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470>.
14. Frangopol D.M., Lin K.Y., Estes A.C. Reliability of Reinforced Concrete Girders Under Corrosion Attack // Journal of Structural Engineering. 1997. Vol. 123. No. 3. Pp. 286-297.
15. Fu X., Chung D.D.L. Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar // Cement and Concrete Research. 1997. Volume 27. Issue 12. Pp. 1811-1815. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00172-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00172-5).
16. Tuutti K. Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel, Quality Control. *Concrete Structures*. 1980. Vol. 1. Pp. 293-301.
17. Atkinson A., Hearne J.A. Mechanistic Model for the Durability of Concrete Barriers Exposed to Sulphate-Bearing Groundwaters. MRS Online Proceedings Library. 1989. Vol. 176. Art.n. 149. <https://doi.org/10.1557/PROC-176-149>.
18. Stewart M.G., Rosowsky D.V. Time dependent reliability deteriorating reinforced concrete bridge decks // Structural Safety. 1998. Vol. 20. Issue 1. Pp. 91-109. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(97\)00021-0](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(97)00021-0).

19. Ting S.-C. The effects of corrosion on the reliability of concrete bridge girders. Dissertation of the University of Michigan, 1989. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(89\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0167-4730(89)90007-6).
20. Ржаницын А.Р. Теория длительной прочности при произвольном одноосном и двухосном нагружении // Строительная механика и расчет сооружений. 1975. № 4. С. 25-29.
21. Тамразян А.Г., Мацевич Т.А. Надежностная оптимизация конструкций с учетом неопределенностей при проектировании // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2022. Сборник докладов Третьей Национальной научной конференции. Москва, 2023. С. 50-54.
22. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5-18.

## REFERENCES

1. Merkulov S.I. Razvitiye teorii konstruktivnoy bezopasnosti ob"yektov v usloviyakh korrozionnykh vozdeystviy [Development of the theory of constructive safety of objects in the conditions of corrosion impacts]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2014. No. 3. Pp. 44-46.
2. Tamrazyan A.G., Koroteev D.D. Assessment of the durability of corrosion-damaged prefabricated reinforced concrete structures // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1687. Pp. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012009>.
3. Smolyago G.A., Dronov V.I., Dronov A.V., Merkulov S.I. Investigation Of Influence Of Defects Of Reinforced Concrete Structures On Corrosion Processes Of Steel Reinforcement. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2014. No. 12. Pp. 49-51. [https://doi.org/10.12737/article\\_5c506209065dd6.02007715](https://doi.org/10.12737/article_5c506209065dd6.02007715).
4. Nogueira K.G., Leonel E.D., Coda H.B. Reliability algorithms for assessing the durability of reinforced concrete structures. *Journal of IBRACON Structures and Materials*. 2012. Vol. 5. No. 4. Pp. 440-450.
5. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability analysis of reinforced concrete slabs with corroded reinforcements. *Building and Reconstruction*. 2022. No. 1(99). Pp. 89-98. (in russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98>
6. Merkulov S.I., Dvornikov V.M., Pakhomova E.G. Performance of reinforced concrete under the influence of aggressive media // *Construction materials, equipment and technologies of the XXI century*. 2006. No. 10. Pp. 10. (in russ.)
7. Yagupov B.A., Migal R.E. On the issue of assessing the bearing capacity of operated reinforced concrete structures damaged by corrosion // *Concrete and reinforced concrete*. 2007. No. 3. Pp. 28-30. (in russ.)
8. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Industrial and civil construction*. 2019. No. 2. Pp. 19-26. (in russ.)
9. Ting S.C., Nowak A.S. Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 88(3), 1991.
10. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 4(80). Pp. 128-137. <https://doi.org/10.18720/MCE.80.12>.
11. Browne R.D. Mechanisms of Corrosion of Steel in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structure. ACISP-65, U.S. Detroit.
12. Andrade C. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements. *Cement and Concrete Research*. 1993. Vol. 23. Pp. 724-742. doi:10.1016/0008-8846(93)90023-3.
13. Matseevich T.A., Andreev I.F. The finite element model of chloride diffusion in pre-stressed corroded reinforcement bars of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022. T. 17(11). Pp. 1462-1470. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470> (in russ.)
14. Frangopol D.M., Lin K.Y., Estes A.C. Reliability of Reinforced Concrete Girders Under Corrosion Attack // *Journal of Structural Engineering*. 1997. Vol. 123. No. 3. Pp. 286-297.
15. Fu X., Chung D.D.L. Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar // *Cement and Concrete Research*. 1997. Volume 27. Issue 12. Pp. 1811-1815. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00172-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00172-5).
16. Tuutti K. Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel, Quality Control. *Concrete Structures*. 1980. Vol. 1. Pp. 293-301.
17. Atkinson A., Hearne J.A. Mechanistic Model for the Durability of Concrete Barriers Exposed to Sulphate-Bearing Groundwaters. *MRS Online Proceedings Library*. 1989. Vol. 176. Art.n. 149. <https://doi.org/10.1557/PROC-176-149>.
18. Stewart M.G., Rosowsky D.V. Time dependent reliability deteriorating reinforced concrete bridge decks. *Structural Safety*. 1998. Vol. 20. Issue 1. Pp. 91-109. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(97\)00021-0](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(97)00021-0).
19. Ting S.-C. The effects of corrosion on the reliability of concrete bridge girders. Dissertation of the University of Michigan, 1989. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(89\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0167-4730(89)90007-6)
20. Rzhantsyn A. R. Teoriya dlitel'noy prochnosti pri proizvol'nom odnoosnom i dvukhosnom zagruzhennii [Theory of long-term strength for arbitrary uniaxial and biaxial loading]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 1975. No 4. Pp. 25-29.

21. Tamrazyan A.G., Matseyevich T.A. Nadezhnostnaya optimizatsiya konstruksiy s uchetom neopredelennostey pri proyektirovanii [Reliability optimization of structures taking into account uncertainties in design]. Aktual'nyye problemy stroitel'noy otrasli i obrazovaniya - 2022. Sbornik dokladov Tret'yey Natsional'noy nauchnoy konferentsii [Actual problems of the construction industry and education - 2022. Collection of reports of the Third National Scientific Conference.]. Moscow, 2023. Pp. 50-54.

22. Tamrazyan A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2023. T. 1(1). Pp. 5-18. (in russ.)

### Информация об авторах:

#### **Мацевич Татьяна Анатольевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики.

E-mail: [MatseevichTA@mgsu.ru](mailto:MatseevichTA@mgsu.ru)

#### **Андреев Илья Федорович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: [yfyf@gmx.com](mailto:yfyf@gmx.com)

### Information about authors:

#### **Matseevich Tatyana A.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,

doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, professor of the department of Higher Mathematics.

E-mail: [MatseevichTA@mgsu.ru](mailto:MatseevichTA@mgsu.ru)

#### **Andreev Ilya F.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,

postgraduate student of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: [yfyf@gmx.com](mailto:yfyf@gmx.com)