

УДК 691.328:004.94

*В. О. БОНДАРЕНКО, А. О. ШИМАНОВСКИЙ*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

## **АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АРМИРОВАННОЙ БАЛКИ С УЧЕТОМ КОРРОЗИИ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ**

Рассматривается деформирование железобетонной балки, опертой по концам, под действием изгибающей нагрузки. Принимается во внимание изменение механических характеристик защитного слоя, связанное с его коррозией. На основе компьютерного моделирования показано, что уменьшение модуля упругости поверхностного слоя бетона ведет существенному увеличению деформаций балки, фиксируя которые можно получать информацию о степени повреждения элемента конструкции здания.

**Ключевые слова:** железобетонная балка, напряженно-деформированное состояние, коррозия защитного слоя.

**Введение.** Железобетонные конструкции при эксплуатации подвергаются действию различных факторов окружающей среды, которые приводят к коррозии защитного слоя бетона. Изменение его физико-механических характеристик, в свою очередь, становится причиной уменьшения жесткости конструкции и увеличения напряжений в ней под действием приложенной нагрузки, что ведет к снижению долговечности. При значительной коррозии бетона его защитных свойств оказывается недостаточно, чтобы предотвратить коррозию арматуры, это еще больше сказывается на прочности балок, плит и иных элементов [1–3]. Поэтому существует практическая необходимость анализа влияния коррозии защитного слоя бетона на несущую способность элементов строительных конструкций.

Модели разрушения строительных конструкций вследствие влияния приложенных к объекту сил и воздействия окружающей среды были предложены в работах [4, 5], где также продемонстрировано существенное изменение напряженно-деформированного состояния армированных конструкций вследствие совместного действия коррозионных сред и силовых факторов.

В научных трудах И. Г. Овчинникова и его коллег [6–8] был представлен системный подход к оценке долговечности конструкций, подверженных действию хлоридосодержащих сред, который включает в себя расчёт на основе сочетания моделей конструктивного элемента, грунтового основания, материала, воздействия среды и модели наступления предельного состояния.

Экспериментальное исследование влияния коррозии на прочность железобетонных балок рассмотрено в статье [9]. Установлено соответствие между степенью коррозии и нагрузкой, вызывающей хрупкое разрушение. Выявлено, что при незначительной коррозии растянутой арматуры наблюдается повышение прочности на сдвиг примерно на 7 % по сравнению с контролем.

ными образцами. Такой эффект связан с повышенным радиальным давлением, появляющимся вследствие расширения продуктов коррозии на границе раздела, что приводит к повышению удерживающей способности арматуры.

В ходе длительного эксперимента, результаты которого описаны в работе [10], было выявлено, что недостаточно учитывать только глубину проникновения и концентрацию хлоридов в защитном слое бетона при прогнозировании срока службы элементов. Жесткость при изгибе также зависит от коррозии растянутой арматуры, которая приводит к уменьшению поперечного сечения стали и нарушению сцепления арматуры с бетоном за счет появления между ними продуктов коррозии.

В работе [11], используя трехмерный нелинейный анализ методом конечных элементов, авторы установили влияние неравномерной коррозии арматуры на пределы текучести и прочности, структуру трещин. При циклическом приложении нагрузок в случае степени коррозии сверх 17 % наблюдалось увеличение податливости железобетонных балок.

В статье [12] представлена конечноэлементная модель, позволяющая анализировать образование трещин в железобетонной балке с учетом поперечной арматуры. Результаты расчетов показали, что наличие такой арматуры позволяет ограничить образование трещин, связанное с наличием коррозии, но эффект снижается по мере удаления от арматурных стержней. В работе [13] рассмотрена численно-аналитическая модель, позволяющая прогнозировать распространение трещин, вызванных хлоридной коррозией.

В статье [14] был предложен метод оценки хлоридной коррозии железобетонных элементов, поврежденных коррозией, при сейсмических воздействиях. Показано, что данный метод дает хорошее соответствие с результатами экспериментов при анализе деформаций изгиба и сдвига.

На основе анализа напряженно-деформированного состояния в зоне наклонных трещин в статье [15] было показано, что коррозионные процессы оказывают значительное влияние на деформации характерного железобетонного элемента. Чем выше уровень напряжений, тем оно более существенно.

Результаты влияния ослабления бетонного участка на перераспределение напряжений в сечении при ударе по железобетонной балке представлены в работе [16]. Они свидетельствуют повышению риска хрупкого разрушения коррозионного-поврежденного элемента вследствие увеличения высоты сжатой зоны бетона.

В статье [17] представлено численное исследование влияния коррозии, вызванной хлоридами, на срок службы конструкций. На основе рассмотренных примеров показано, что уменьшение толщины защитного слоя бетона с 30 до 25 мм и увеличение водоцементного отношения с 0,5 до 0,55 может привести к снижению срока службы более, чем на 20 и 30 % соответственно.

В работе [18] представлен алгоритм расчета, позволяющий оценить изменение напряженно-деформированного состояния железобетонной плиты,

подверженной действию хлоридной коррозии с использованием метода сеток. Приведенные результаты показывают, что коррозия может приводить к уменьшению долговечности конструкции в два раза и более.

Обзор исследований, в которых для анализа влияния коррозии на прочность железобетонных конструкций использовался метод конечных элементов, представлен в работе [19].

В данном исследовании анализируется влияние коррозии защитного слоя на напряженно-деформированное состояние армированной балки, опирающейся концами на горизонтальную поверхность. В качестве средства решения задачи использован программный комплекс ANSYS Mechanical, в котором реализован метод конечных элементов.

**Постановка задачи.** Объектом данного исследования является консольная балка длиной 3 м, которая имеет прямоугольное поперечное сечение  $120 \times 220$  мм. Ее армирование осуществляется тремя стальными стержнями диаметром 8 мм. С учетом эксплуатации в умеренной атмосферной среде принято, что толщина защитного слоя бетона 20 мм. Чтобы учесть изменение механических характеристик бетона, связанное с его коррозией, защитный слой разделен на пластины, в пределах которых модуль упругости и коэффициент Пуассона принимались постоянными. На рисунке 1 представлены графики, демонстрирующие зависимости модулей упругости бетонов разных классов в зависимости от расстояния до фронта коррозии, которые построены на основе информации, приведенной в работах [20, 21]. Коэффициент Пуассона во всех слоях бетона принят равным 0,2.

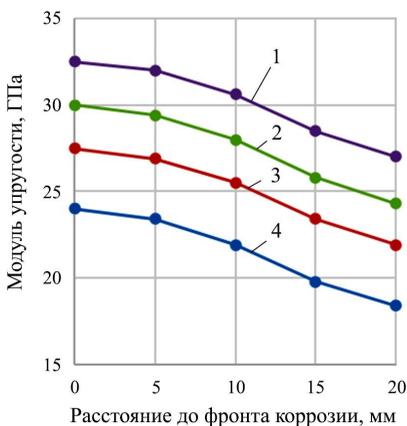


Рисунок 1 – Изменение модуля упругости в зависимости от глубины проникновения коррозии для бетона класса:

1 – C<sub>25/30</sub>, 2 – C<sub>20/25</sub>, 3 – C<sub>16/20</sub>, 4 – C<sub>12/15</sub>,

Модуль упругости арматурных стержней принят равным 210 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3.

На первом этапе создана геометрическая модель выделенного структурного элемента, разделенного на объёмы с различными характеристиками, которая представлена на рисунке 2.

Далее выполнено разбиение модели на конечные элементы. Как для бетона, так и для арматуры использован элемент SOLID65. Общее число элементов модели составило около 30000.

Силы, которые приложены к верхней грани балки в области контакта, прикладывались как равномерно распределенное статическое давление размером 25 кПа. Также учитывалась сила тяжести самой балки. При задании гра-

ничных условий принято, что балка опирается обоими своими концами на основание. В этом случае схема деформирования является симметричной, поэтому расчеты велись для половины балки, а в месте ее разделения на части задавалось условие симметрии.

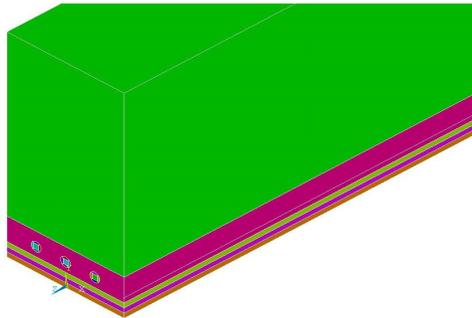


Рисунок 2 – Геометрическая модель железобетонной балки

В ходе выполнения расчетов получены распределения эквивалентных напряжений и деформаций арматуре и бетонной матрице. На рисунке 3 представлена схема распределения эквивалентных по Мизесу напряжений в бетонной матрице для случая отсутствия коррозии.

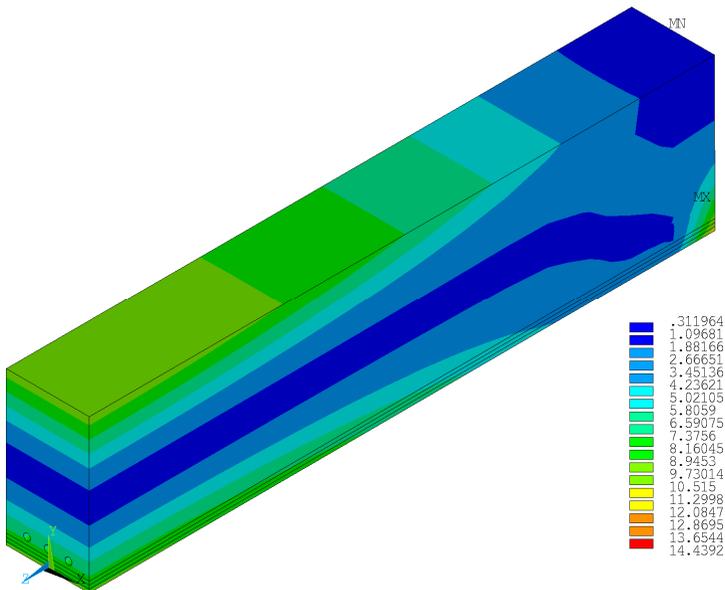


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений, МПа, в железобетонной балке без учета коррозии

Изменение механических характеристик слоев балки, связанное с протеканием процессов деградации бетона, не привело к существенному изменению картины распределения напряжений. Из приведенной схемы видно, что наибольшие напряжения возникают в месте опирания балки на основание. Именно там должны располагаться закладные детали. Максимальные напряжения в арматурных стержнях оказались приблизительно в пять раз большими, чем в бетоне.

На рисунке 4 приведена схема распределения сдвиговых напряжений в области расположения арматурных стержней. Как видно из приведенной шкалы напряжений, их значения оказались на порядок меньшими, чем эквивалентные напряжения. Замечено, что увеличение толщины подвергнутого коррозии бетона приводит к увеличению неравномерности напряжений вблизи арматурных стержней, которая приводит к образованию трещин.

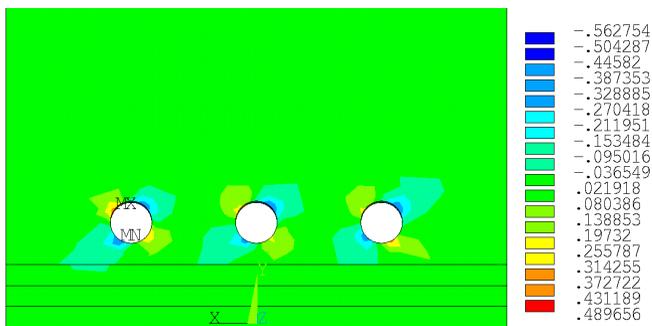


Рисунок 4 – Схема распределения сдвиговых напряжений  $\sigma_{xy}$  (значения в МПа)

Анализ деформаций балки (рисунок 5) показал, что их градиент растет при увеличении глубины проникновения коррозии. Изменение деформации, соответствующее состоянию, при котором она достигает арматурных стержней, может быть легко зафиксировано приборами. Таким образом, появляется возможность оперативного контроля состояния конструкции.

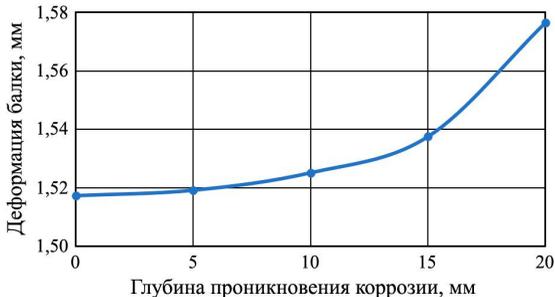


Рисунок 5 – Зависимость деформации балки от глубины проникновения коррозии

**Выводы.** В работе предложена методика конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния армированной балки с учетом коррозии бетона. Полученные результаты показали, что напряжения в балке до тех пор, пока не начнется коррозия арматуры, меняются незначительно. В то же время, фиксируя деформации железобетонной балки, можно установить момент, при котором начинается развитие коррозии арматуры, что может быть учтено при анализе технического состояния здания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete – Analytical and empirical models / K. Bhargava [et al.] // *Nuclear Engineering and Design*. – 2007. – Vol. 237, is. 11. – P. 1140–1157.

2 **Васильев, А. А.** Оценка и прогнозирование технического состояния железобетонных конструкций с учетом карбонизации бетона : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 215 с.

3 Analytical method for the evaluation of the residual service life of prestressed concrete beams subjected to corrosion deterioration / L. Franceschini [et al.] // *Structural Concrete*. – 2022. – Vol. 23, is. 1. – P. 121–137.

4 **Гузев, Е. А.** Интегральный метод оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов в случае воздействия агрессивной среды и силовой нагрузки / Е. А. Гузев, В. М. Бондаренко, Н. В. Савицкий // *Коррозионная стойкость бетона и железобетона в агрессивных средах*. – М. : НИИЖБ, 1984. – С. 20–27.

5 **Бондаренко, В. М.** К вопросу об оценке силового сопротивления железобетона повреждению коррозионными воздействиями / В. М. Бондаренко, В. Н. Прохоров // *Известия вузов. Строительство*. – 1998. – № 3. – С. 30–41.

6 **Петров, В. В.** Расчет элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой / В. В. Петров, И. Г. Овчинников, Ю. М. Шихов. – Саратов : Изд-во СГУ, 1987. – 228 с.

7 **Овчинников И. Г.** Работоспособность сталежелезобетонных элементов конструкций в условиях воздействия хлоридсодержащих сред / И. Г. Овчинников, В. В. Раткин, Р. Б. Гарибов. – Саратов : Изд-во СГУ, 2002. – 155 с.

8 **Овчинников, И. И.** Применение нелинейной деформационной модели для анализа поведения армированных пластин на упругом основании, взаимодействующих с хлоридсодержащей средой. Основные соотношения / И. И. Овчинников, И. Г. Овчинников // *Инженерно-строительный журнал*. – 2012. – № 1 (36). – С. 27–38.

9 **Tan, N. N.** An experimental study on the shear capacity of corroded reinforced concrete beams without shear reinforcement / N. N. Tan, N. T. Kien // *Journal of Science and Technology in Civil Engineering, NUCE*. – 2021. – Vol. 15, is. 1. – P. 55–66.

10 **Vidal, T.** Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment / T. Vidal, A. Castel, R. François // *Cement and Concrete Research*. – 2007. – Vol. 37, is. 11. – P. 1551–1561.

11 Finite element analysis of RC beams subjected to non-uniform corrosion of steel bars / R. Biswas [et al.] // *Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT5)*. – Coventry : Coventry University, 2019. – 12 p.

12 Developing a three-dimensional finite element analysis approach to simulate corrosion-induced concrete cracking in reinforced concrete beams / Y. Z. Wang [et al.] // *Engineering Structures*. – 2022. – Vol. 257. – Article 114072. – 16 p.

13 A prediction model for concrete cracks due to chloride-induced corrosion / J. Wang [et al.] // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 2020. – Article 1049258. – 12 p.

14 Jung, J.-S. Structural performance degradation of corrosion-damaged reinforced concrete beams based on finite element analysis / J.-S. Jung, J.-W. Jeong, K.-S. Lee // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – Article 2090. – 24 p.

15 Колчунов, В. И. Напряженно-деформированное состояние нагруженного и коррозионно-поврежденного железобетона в зоне наклонных трещин / В. И. Колчунов, М. С. Губанова // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. – 2016. – № 2 (42). – С. 11–22.

16 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.

17 Ramos, É. S. Numerical analysis of reinforced concrete beam subject to pitting corrosion / É. S. Ramos, R. Carrazedo // *Ambiente Construído*. – 2022. – Vol. 22, no. 1. – P. 201–222.

18 Shimanovsky, A. Influence of chloride corrosion on the stress-strain state of the reinforced concrete plate on an elastic base / A. Shimanovsky, S. Gridnev, I. Ovchinnikov // *Rural development 2017: Bioeconomy Challenges: Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Scientific Conference*. – Kaunas : Aleksandras Stulginskis University, 2017. – P. 417–422.

19 Sumangala, K. Finite element analysis of RC beam subjected to corrosion – A review / K. Sumangala, C. M. Flora Dani // *International Journal of Research in Engineering and Science*. – 2021. – Vol. 9, is. 6. – P. 59–63.

20 Попеско, А. И. Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии / А. И. Попеско. – СПб. : СПб. гос. архит.-строит. ун-т, 1996. – 182 с.

21 Овчинников, И. И. Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами / И. И. Овчинников, Г. А. Наумова. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2007. – 272 с.

V. O. BANDARENKA, A. O. SHIMANOVSKY

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **ANALYSIS OF A REINFORCED BEAM DEFORMATION CONSIDERING THE PROTECTIVE LAYER CORROSION**

Deformation of a supported at the ends reinforced concrete beam under the bending load action is considered. The change in the protective layer mechanical characteristics associated with its corrosion is taken into account. On the basis of computer simulation, it is shown that a decrease in the concrete surface layer elasticity modulus leads to a significant increase in beam deformations, using their determination it is possible to obtain information on the damage degree for a building structural element.

**Keywords:** reinforced concrete beam, stress-strain state, protective layer corrosion.

Получено 07.11.2022