

УДК 69.07

Г.А. Смоляго, д-р техн. наук, профессор, БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия)
(e-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com)

А.В. Дронов, ассистент, БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия)
(e-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com)

Н.В. Фролов, аспирант, БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия)
(e-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ХЛОРИДНОЙ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

В статье рассмотрены процессы депассивации стальной арматуры в бетоне под действием хлоридов. Описан подход и методика проведения длительных экспериментальных исследований железобетонных изгибаемых конструкций в рамках периода развития коррозионных повреждений стальной арматуры.

Представлены результаты экспериментальных исследований коррозионных процессов стальной арматуры железобетонных однопролетных балок в агрессивной хлоридной среде. Приведена диаграмма изменения коррозионного потенциала за время проведения испытаний. Измерения коррозионного потенциала проведены с помощью анализатора коррозии. Произведен анализ изменений коррозионного потенциала с течением времени, даны объяснения особенностей изменения темпов развития коррозии на поверхности арматурных стержней. Рассмотрены особенности развития и характер повреждений хлоридной коррозии. Изучены следы коррозионных повреждений на поверхности арматурных стержней, проведены измерения глубины и диаметра коррозионных питтингов. Установлены прочностные и деформационные характеристики стальной арматуры путем испытания стержней в разрывной машине.

Представлена математическая модель развития коррозионных повреждений, учитывающая уменьшение площади поперечного сечения арматуры в условиях хлоридной агрессивной среды с течением времени. Данная модель позволяет учитывать влияние величины защитного слоя бетона на глубину коррозионных повреждений. Сравнение опытных и теоретических данных позволило сделать выводы о достаточно высокой точности определения глубины коррозии посредством разработанной математической модели. Предложены области применения разработанной математической модели. Представленная модель позволяет учесть коррозионные повреждения арматуры железобетонных элементов путем перерасчета площади поперечного сечения его стержней и может быть реализована при определении прочности и деформативности конструкций. Возможно применение представленной модели при прогнозировании остаточного срока службы конструкций и оценке степени их физического износа и долговечности.

Ключевые слова: хлоридная коррозия, арматура, эксперимент, математическая модель.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-1-43-49

Ссылка для цитирования: Смоляго Г.А., Дронов А.В., Фролов Н.В. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 1(70). С. 43–49.

Введение

Среди коррозионных процессов, приводящих к значительным повреждениям железобетонных конструкций, коррозия арматуры в бетоне под действием хлоридов является наиболее распространенным [1, 2]. Действию хлоридов подвержены конструкции перекрытий бассейнов, пар-

кингов, мостов, конструкции, эксплуатируемые в условиях жидкой или воздушной хлоридной среды или имеющие хлоридсодержащие добавки в бетоне.

При высокой концентрации хлоридов, недостаточно низкой проницаемости бетона и малой величине защитного слоя бетона инкубационный период становится весьма непродолжительным. Коррозия

арматурной стали под действием хлоридов развивается локально в местах разрушения оксидной пленки. Растворимость продуктов хлоридной коррозии может привести к значительным поражениям стали без видимых повреждений защитного слоя бетона. Низкое электрическое сопротивление бетона облегчает миграцию хлорид-ионов, способствуя развитию питтинговой коррозии. Высокая щелочность бетона препятствует увеличению поверхности питтинга; в таком случае коррозия распространяется вглубь металла [3].

В целях изучения процессов хлоридной коррозии арматурной стали в бетоне и ее влияния на прочность нормальных сечений и деформативность железобетонных изгибаемых элементов, авторами были проведены длительные экспериментальные исследования однопролетных железобетонных балок прямоугольного сечения в сильноагрессивной хлоридной среде [4]. В состав бетонной смеси 8 балок была введена добавка поваренной соли в соотношении 5% от массы цемента,

что привело к депассивации поверхности арматуры и значительно повысило скорость развития коррозионных процессов в пределах сроков испытаний образцов, которые составили 14 месяцев для одной половины балок и 21 месяц – для другой. В ходе проведения испытаний поверхность балок регулярно смачивалась водой.

Динамика и характер коррозионных процессов учитывались путем измерения коррозионного потенциала с помощью анализатора коррозии Proceq Canin. Для этого с рабочими стержнями каркаса был предусмотрен контакт для подключения прибора. Измерение проводилось по боковым граням образцов с помощью стержневого электрода. Анализ изменения коррозионного потенциала в пределах одного образца показал, что градиент потенциала составляет в среднем 30...60 мВ для всех балок.

Результаты измерений коррозионного потенциала за общее время проведения длительной части эксперимента приведены на рисунке 1.

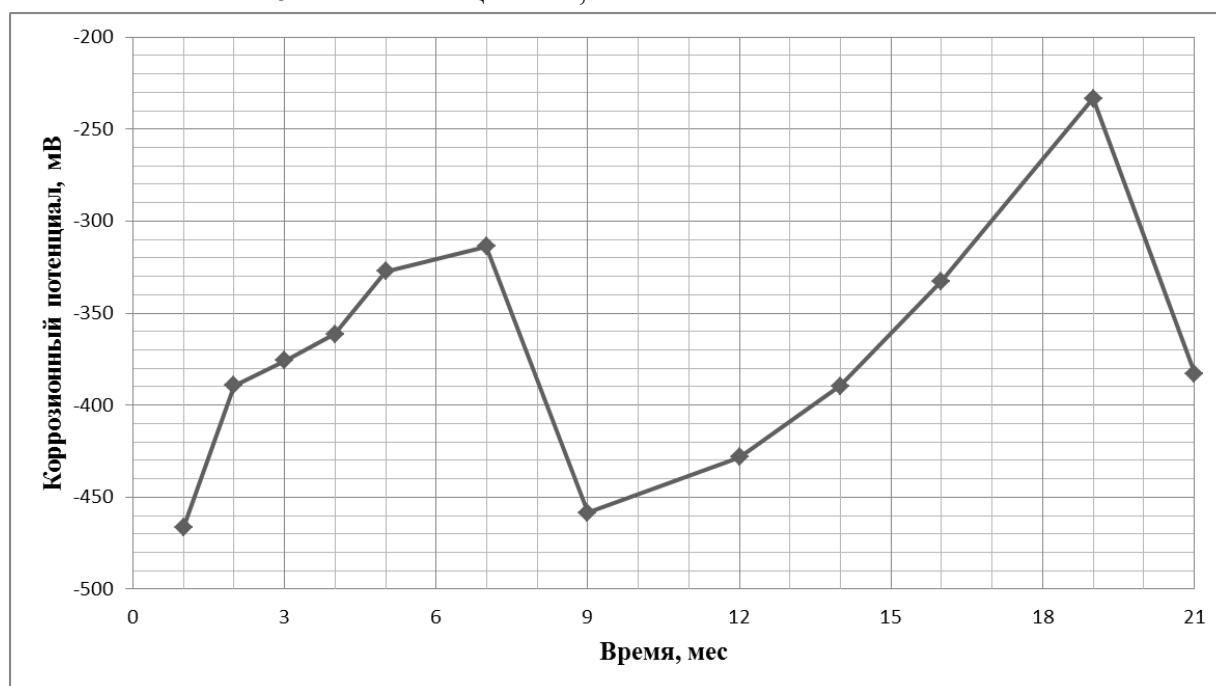


Рис. 1. Диаграмма изменения коррозионного потенциала за время проведения испытаний

Скачкообразные циклические изменения значений потенциала связаны с сезонными изменениями температуры и влажности помещения. Значения коррозионного потенциала с разницей в один год различаются в среднем на 30...70 мВ, причем спустя один год значение потенциала увеличивается, что свидетельствует о более низкой скорости коррозии и снижении темпа ее развития с течением времени в годовом масштабе времени. Уменьшение скорости развития коррозии может быть объяснено накоплением продуктов коррозии у поверхности арматуры, частично ограничивающих доступ

агрессивной среды к неповрежденной поверхности арматурных стержней.

Коррозионные повреждения стальной арматуры были изучены на продольных рабочих стержнях диаметром 6 мм и 8 мм класса А240, величина защитного слоя бетона составляла 10 мм и 15 мм. Исследование арматурных стержней после проведения испытаний показало многочисленные образования близко расположенных питтингов на поверхностях стержней (рис. 2). При этом проявляется выраженное развитие коррозии вглубь стержня, а глубина коррозии питтингов неравномерна.



Рис. 2. Вид коррозионных повреждений на поверхностях стержней

Испытание арматурных стержней на растяжение в разрывной машине установило соответствие их механических характеристик диаграммам деформирования арматурной стали без коррозионных повреждений. Из этого следует, что коррозия арматурной стали рассматриваемого класса и состава не оказывает значительного влияния на ее прочностные и деформационные характеристики.

На основании полученных данных испытаний была разработана математическая модель, описывающая процессы развития коррозионных повреждений стальной арматуры с течением времени.

При ее разработке также были учтены экспериментальные и теоретические работы других авторов [5,6,7,8,9,10].

В области рассматриваемой модели были приняты следующие допущения:

1. Рассматривается только коррозионный период.
2. Агрессивность среды по отношению к арматуре остается постоянной в пределах рассматриваемого периода времени.
3. Диффузионная проницаемость бетона защитного слоя к агрессивной среде остается постоянной в пределах рассматриваемого периода времени и не испыты-

вает значительного влияния от образования в нем трещин.

4. Механические характеристики арматурной стали остаются постоянными в пределах рассматриваемого периода времени.

5. Изменение сцепления арматуры с бетоном в результате накопления на контактной поверхности продуктов коррозии незначительно или отсутствует.

6. Положение центра тяжести сечения рабочей арматуры в поперечном сечении элемента остается постоянным.

Расчет железобетонных конструкций с коррозионными повреждениями сводится к анализу напряженно-деформированного состояния сечений элемента, в которых произошло изменение площади поперечного сечения рабочей арматуры за определенный промежуток времени.

$$A_s^* = A_s - \Delta A_s, \quad (1)$$

где A_s^* – остаточная площадь сечения арматуры; A_s – начальная площадь сечения арматуры; ΔA_s – площадь арматуры, потерянная в результате коррозии.

Потеря сечения происходит в пределах кругового сегмента (рис. 3), что учитывает характер коррозионных повреждений арматуры в хлоридной среде при развитии питтингов. Тогда:

$$\Delta A_s = R^2 \arccos\left(\frac{c}{R}\right) - c\sqrt{R^2 - c^2}, \quad (2)$$

где R – радиус стержня; δ – глубина коррозии; $c = R - \delta$.

Глубину коррозионных повреждений предлагается определять по формуле

$$\delta = \frac{k}{\sqrt{a}} \cdot t^n, \quad (3)$$

где k – эмпирический коэффициент, отражающий влияние на распространение коррозии постоянных параметров; n – эмпирический коэффициент, отражающий изменение скорости коррозии со временем, $0 < n < 1$, a – величина защит-

ного слоя бетона, мм. Влияние величины защитного слоя на глубину коррозии, представленное в формуле (3), объясняется снижением концентрации агрессивных ионов при увеличении глубины их проникновения.

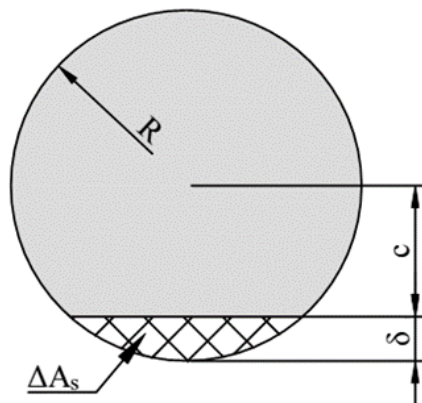


Рис. 3. Схема коррозионного износа поперечного сечения арматурного стержня

Так как кинетика коррозионного процесса определяется накоплением продуктов коррозии, препятствующих доступу агрессивной среды к поверхности арматурной стали, то полученная математическая модель может быть применена в масштабах времени, отличных от сроков проведения эксперимента, а опытные значения эмпирического коэффициента n могут быть использованы в расчетах эксплуатируемых железобетонных конструкций с другими конструктивными решениями.

Для оценки достоверности разработанной математической модели был выполнен расчет значений глубины коррозии арматурных стержней опытных образцов основной группы с последующим их сравнением с фактическими данными измерений поврежденных сечений арматуры. Значение коэффициента k принято одинаковым для всех образцов, так как все образцы подвергались испытаниям в одной и той же среде. Результаты расчета приведены в таблице.

Теоретические значения величин коррозионных повреждений арматуры
опытных образцов основной группы

Маркировка образца	Значения коэффициентов		Защитный слой бетона а, мм	Время коррозии t, лет	Глубина коррозии δ, мм		Остаточная площадь сечения арматуры A_s^* , см ²
	k	n			$\delta^{теор}$	$\delta^{он}$	
6-15-I	2,12	0,64	15	1,75	0,783	0,79	0,261
6-15-II				1,167	0,604	0,58	0,268
6-10-III			10	1,75	0,959	0,97	0,254
6-10-IV				1,167	0,740	0,73	0,263
8-15-I		0,72	15	1,75	0,819	0,81	0,476
8-15-II				1,167	0,612	0,54	0,485
8-10-III			10	1,75	1,003	0,99	0,466
8-10-IV				1,167	0,749	0,78	0,479

Погрешность определения глубины коррозии во всех образцах не превысила 5%, за исключением образца 8-15-II, в котором погрешность составляет 13%. Полученные результаты свидетельствуют о достаточно достоверном определении глубины коррозии согласно разработанной математической модели.

Представленная методика позволяет учесть коррозионные повреждения арматуры железобетонных элементов путем перерасчета площади поперечного сечения его стержней и может быть реализована с использованием различных методов расчета при определении прочности и деформативности конструкций в соответствии с требованиями безопасности и надежности. Также возможно применение представленной модели при прогнозировании остаточного срока службы конструкций, оценке степени их физического износа и долговечности.

Выводы и заключения

На основании проведенных экспериментальных исследований было установлено, что в условиях действия хлоридной среды коррозионные повреждения сталь-

ной арматуры в бетоне развиваются в виде отдельных питтингов, а глубина коррозии неравномерна, при этом распространение вглубь стержня имеет затухающий характер.

В ходе экспериментальных исследований не было обнаружено значительного влияния коррозионных процессов на изменение прочностных и деформативных характеристик стали и потерю сцепления арматуры с бетоном.

Представлена математическая модель развития коррозионных повреждений, учитывающая уменьшение площади поперечного сечения арматуры в условиях хлоридной агрессивной среды. Данная модель учитывает изменение глубины коррозии арматуры с течением времени и характер распределения повреждений в поперечном сечении арматурного стержня. Рассмотрено влияние величины защитного слоя бетона на глубину коррозии арматуры.

Разработанная математическая модель развития коррозионных повреждений арматуры достоверно описывает изменение глубины и площади сечения арматурных стержней с течением времени и

достаточно удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Васильев А.А. Карбонизация и оценка поврежденности железобетонных конструкций. – Гомель: БелГУТ, 2012. – 263 с.

2. Изучение влияния дефектов железобетонных конструкций на развитие коррозионных процессов арматуры / Г.А. Смоляго, В.И. Дронов, А.В. Дронов, С.И. Меркулов // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 12. — С. 25-27.

3. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

4. Исследование аспектов хлоридной коррозии железобетонных конструкций / Г.А. Смоляго, А.А. Крючков, С.В. Дрокин, А.В. Дронов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – №2. – С. 22-24.

5. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcements / J.A. Gonzalez, C. Andrade, C. Alonso, S. Felifi // Cement & Concrete Research, 1995, vol. 25 (2), – pp. 257-264.

6. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // Materials and Structures, 2004, vol. 37, pp. 623-643.

7. Овчинников И.Г., Дядькин Н.С. Расчет элементов конструкций с наведенной неоднородностью при различных схемах воздействия хлоридсодержащих сред. – Саратов: СГТУ, 2003. – 215 с.

8. Исследование работоспособности изгибаемых железобетонных конструкций с учетом коррозионных повреждений / С.И. Меркулов, Е.Г. Пахомова, А.В. Гордеев, А.С. Маяков // Известия Курского государственного технического университета. – 2009. – №4. – С. 74-78.

9. Пахомова Е.Г., Переверзев Е.О., Конорев Д.Ф. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений при воздействии агрессивных сред // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2014. – №1. – С. 72-74.

10. Леонович С.Н., Прасол А.В. Железобетон в условиях хлоридной коррозии: деформирование и разрушение // Строительные материалы. – 2013. – № 5. – С. 94-95.

Поступила в редакцию 07.12.16

UDC 69.07

G.A. Smolyago, Doctor of Sciences, Professor, BSTU named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russia) (e-mail: anddre13@rambler.ru)

A.V. Dronov, Assistant, BSTU named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russia) (e-mail: anddre13@rambler.ru)

N.V. Frolov, Assistant, BSTU named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russia) (e-mail: anddre13@rambler.ru)

MODELING OF REDUCTION IN THE CROSS-SECTIONAL AREA OF STEEL REINFORCEMENT IN CONCRETE UNDER THE ACTION OF CORROSIVE ENVIRONMENT

Process of depassivation of steel in concrete under the action of chloride corrosive environment is considered. Method of durable testing of bended reinforced concrete structures during corrosive period is described.

Results of experimental research in steel reinforcement corrosion in reinforced concrete beams under the action of corrosive environment are described in the article. The diagram of corrosive potential changes during the

testing time is given in the article. Measurements of corrosion potential were carried out by the corrosion analyzing instrument. Analysis of corrosive potential changes during the testing time was carried out. Main properties and features of chloride corrosion process and damages are considered. Corrosive pits on the surface of the reinforcement bars were studied. Measurements of depth and diameter of the corrosive pits were carried out. Stress-strain diagrams of steel after the corrosive period were obtained.

Mathematical model of reduction in the cross-sectional area of steel reinforcement in concrete under the action of corrosive chloride environment is suggested. This model allows to consider effect of concrete cover thickness on depth of corrosion. Comparison of experimental results and theoretical calculations reveals high accuracy of corrosion damage definition by given mathematical model. The ways to use the model are suggested. The given model allows to consider corrosive damages of steel rebars by definition of cross-section area losses and may be used in calculations of strength and deformations of RC structures. It's possible to use the model for prediction of the remaining strength life of RC structures.

Key words: chloride corrosion, steel reinforcement, experiment, mathematical model.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-1-43-49

For citation: Smolyago G.A., Dronov A.V., Frolov N.V. Modeling of Reduction in the Cross-Sectional Area of Steel Reinforcement in Concrete under The Action of Corrosive Environment, Proceeding of Southwest State University, 2017, vol. 21, no. 1(70), pp. 43-49 (in Russ.).

Reference

1. Vasil'ev A.A. Karbonizacija i ocenka povrezhdennosti zhelezobetonnyh konstrukcij. – Gomel': BelGUT, 2012. – 263 s.

2. Izuchenie vlijaniya defektov zhelezobetonnyh konstrukcij na razvitie korrozionnyh processov armatury / G.A. Smoljago, V.I. Dronov, A.V. Dronov, S.I. Merkulov // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014. – № 12. — S. 25-27.

3. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnyh sredah / S.N. Alekseev, F.M. Ivanov, S. Modry, P. Shissl'. – M.: Strojizdat, 1990. – 320 s.

4. Issledovanie aspektov hlорidnoj korrozii zhelezobetonnyh konstrukcij / G.A. Smoljago, A.A. Krjuchkov, S.V. Drokin, A.V. Dronov // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. – 2014. – №2. – S. 22-24.

5. Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcements / J.A. Gonzalez, C. Andrade, C. Alonso, S. Felifi // Cement & Concrete Research, 1995, vol. 25 (2), pp. 257-264.

6. Andrade C., Alonso C. Test methods for on-site corrosion rate measurement of

steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method // Materials and Structures, 2004, vol. 37, pp. 623-643.

7. Ovchinnikov I.G., Djad'kin N.S. Raschet jelementov konstrukcij s navedennoj neodnorodnost'ju pri razlichnyh shemah vozdeystvija hlорidsoderzhashhih sred. – Caratov: SGTU, 2003. – 215 s.

8. Issledovanie rabotosposobnosti izgibaemyh zhelezobetonnyh konstrukcij s uchetom korrozionnyh povrezhdenij / S.I. Merkulov, E.G. Pahomova, A.V. Gordeev, A.S. Majakov // Izvestija Kurskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. – 2009. – №4. – S. 74-78.

9. Pahomova E.G., Pereverzev E.O., Konorev D.F. Dolgovechnost' zhelezobetonnyh konstrukcij inženernykh sooruzhenij pri vozdeystvii agressivnyh sred // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii. – 2014. – №1. – S. 72-74.

10. Leonovich S.N., Prasol A.V. Zhelezobeton v uslovijah hlорidnoj korrozii: deformirovanie i razrushenie // Stroitel'nye materialy. – 2013. – № 5. – S. 94-95.