

DOI: 10.12737/24678

Дронов А.В., ассистент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПИТТИНГОВОЙ КОРРОЗИИ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

dronov.andrey.1989@gamil.com

В статье рассмотрены два основных вида процессов депассивации арматурной стали в бетоне: карбонизация бетона защитного слоя и проникновение хлоридов в бетон. Изучены основные особенности коррозионных процессов, вызванных карбонизацией бетона и действием хлоридов, и выполнено их сравнение, на основании которого было установлено, что коррозия арматурной стали под действием хлоридов является наиболее опасной из-за меньших сроков инициации, а также из-за сложности раннего обнаружения и значительной потери площади поперечного сечения арматуры. Описана методика проведения длительных испытаний железобетонных балок под действием гравитационной нагрузки и агрессивной хлоридной среды в целях изучения аспектов питтинговой коррозии. Приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных изгибаемых элементов с коррозионными повреждениями арматуры. Установлены особенности развития коррозионных трещин для случаев питтинговой коррозии. Установлен характер распределения коррозионных повреждений арматурных стержней, а также их влияние на прочностные характеристики железобетонных конструкций.

Ключевые слова: коррозия арматуры, питтинг, прочность, железобетонные конструкции.

Введение. Одним из наиболее опасных деградационных процессов в железобетоне является коррозия стальной арматуры в следствие карбонизации бетона или проникновения хлоридов к поверхности стали. Данные типы коррозии отличаются не только продолжительностью периода инициации коррозии, но и самими механизмами депассивации стали в бетоне.

Карбонизация бетона обусловлена растворением гидроксида кальция из цементного камня с последующим образованием карбонатов в поровом пространстве бетона в присутствии влаги и углекислого газа [1]. Уменьшение концентрации щелочных компонентов приводит к снижению щелочности бетона защитного слоя с $\text{pH} = 12,5$ до $\text{pH} = 9$ и ниже, что создает благоприятную среду для развития коррозии на поверхности арматуры [2]. При равномерном продвижении фронта карбонизации в бетоне коррозия стальной арматуры будет иметь общий характер, при котором потери сечения арматуры распределены равномерно по поверхности вдоль стержня. Данный тип коррозии приводит к раннему появлению коррозионных трещин в бетоне от давления продуктов коррозии, что позволяет выявить развитие коррозионных процессов на ранних этапах. Распространение коррозии по поверхности стали приводит к потере сцепления арматуры с бетоном, нарушая их совместную работу. В работе [3] было экспериментально установлено, что в случае общей коррозии потеря несущей способности железобетонных балок происходит в следствие потери сцепления арматуры с бетоном, а влияние уменьшение площади

поперечного сечения арматуры на прочность балок при испытаниях на изгиб незначительно.

Депассивация арматурной стали в хлоридной среде обусловлена только концентрацией хлоридов на поверхности стали, при этом инициация коррозии может происходить при значениях $\text{pH} = 11,5$ [1]. При этом период инициации коррозии может быть значительно ниже, чем при карбонизации. В результате коррозия развивается вглубь стержня в виде питтингов на поверхности стали и приводит к значительным потерям площади поперечного сечения арматуры [4]. Развиваясь локально, питтинговая коррозия приводит к более позднему образованию коррозионных трещин в защитном слое бетона. Однако, следует отметить, что нарушение сцепления арматуры с бетоном в случае питтинговой коррозии практически отсутствует, так как большая часть поверхности стержней остается неповрежденной. В экспериментальной работе [5] было установлено, что снижение несущей способности железобетонных балок практически пропорционально уменьшению площади поперечного сечения продольной рабочей арматуры. В работе [1] говорится, что при наличии в бетоне большого количества хлоридов образуется множество близко расположенных питтингов, что соответствует состоянию общей коррозии.

В табл. 1 произведено сравнение двух видов коррозии стальной арматуры в бетоне, основанное на теоретических и экспериментальных работах [3–8].

Анализируя особенности развития коррозии стальной арматуры в бетоне вследствие карбонизации бетона и действия хлоридов, можно

заклучить, что коррозия арматуры в хлоридной среде является наиболее опасной из-за меньших сроков инициации, а также из-за сложности раннего обнаружения значительных потерь площади поперечного сечения арматуры. В связи с этим, автором были изучены основные осо-

бенности развития питтинговой коррозии стальной арматуры в бетоне и проведены экспериментальные исследования по прочности и деформативности железобетонных однопролетных балок с коррозионными повреждениями арматуры.

Таблица 1

Сравнение видов коррозии стальной арматуры в бетоне

Параметр сравнения	Вид коррозии	
	Коррозия, вызванная карбонизацией бетона	Коррозия, вызванная действием хлоридов
Период инициации коррозии	определяется продвижением фронта карбонизации в защитном слоя бетона	определяется концентрацией хлоридов на поверхности стали
Щелочность бетона в период коррозии	pH < 9	снижение pH не наблюдается
Характер повреждений	общий	локальный
Образование коррозионных трещин	раннее образование трещин, направленных вдоль арматурных стержней	позднее локальное образование трещин
Тип разрушения	потеря сцепления арматуры с бетоном	пластичное, по нормальному сечению

Методология. Автором проведены экспериментальные исследования железобетонных однопролетных балок при длительном действии нагрузки в хлоридной агрессивной среде с целью изучения аспектов питтинговой коррозии [9]. 12 опытных образцов балок прямоугольного сечения размерами поперечного сечения 60 x 100 (h) мм и пролетом 1,4 м подвергались действию агрессивной среды на протяжении 14 и 21 месяцев путем введения добавки NaCl в состав бетонной смеси в соотношении 5 % от массы цемента и последующим смачиванием поверхности образцов. Армирование образцов выполнено в виде плоских каркасов с рабочей армату-

рой из стальных горячекатаных стержней Ø6 мм и Ø8 мм класса А240. Использовано 2 варианта величины защитного слоя бетона: 10 и 15 мм. Класс бетона по прочности на сжатие – В15.

Для анализа коррозии арматуры под нагрузкой балки были загружены сосредоточенной нагрузкой $P = 0,7P_{разр}$. По окончании периода длительных испытаний образцы были разгружены и испытаны кратковременной нагрузкой на изгиб с доведением до разрушения (рис. 1). Расчетная схема была изменена для получения в середине пролета зоны максимального изгибающего момента.



Рис. 1. Вид испытательного стенда

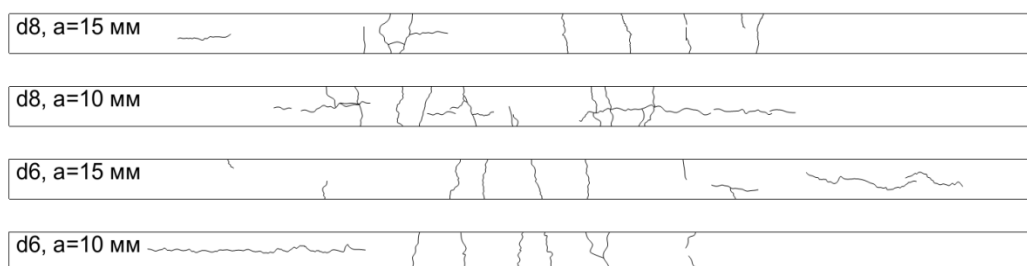
В ходе испытаний производились измерения прогибов в середине пролета посредством индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, продольных деформаций бетона сжатой и растянутой зон с помощью индикаторов часового типа МИГ-1 с ценой деления 0,001 мм и базой измерения 200 мм, а также тензорезисторов с базой измерения 50 мм. В ходе проведения испытаний регистрировались этапы развития и ширина раскрытия нормальных и наклонных трещин, с помощью микроскопа МПБ-100.

Основная часть. В результате испытаний установлено, что несмотря на равномерное распределение хлоридов в бетоне, коррозия арматуры развивается в виде питтингов с распространением вглубь стержня, что опровергает предположение об общей хлоридной коррозии. Общие потери массы стержней в результате коррозии составили 1,5...2,0 % за 14 месяцев испытаний и 2,0...2,6 % за 21 месяц испытаний. При этом потери площади поперечного сечения

в местах расположения питтингов составили 4...7 % за 14 месяцев испытаний и 6...10 % за 21 месяц испытаний, что до 4 раз превышает потери массы стержней.

Спустя 4 месяца длительных испытаний железобетонных балок на поверхностях нижних граней начали проявляться трещины несилового характера, направленные вдоль рабочей арматуры и вызванные давлением продуктов коррозии стальной арматуры на бетон контактного слоя. На рис. 2 представлены схемы расположения таких трещин совместно с нормальными трещинами силового происхождения на нижних гранях образцов в процессе испытаний. Следует отметить что распределение коррозионных трещин неравномерно по длине арматурных стержней, трещины расположены локально и отсутствуют на некоторых участках развития коррозии. Данные особенности раскрытия коррозионных трещин затрудняют обнаружение развития коррозии арматуры на ранних этапах.

Срок испытаний - 14 месяцев:



Срок испытаний - 21 месяц:

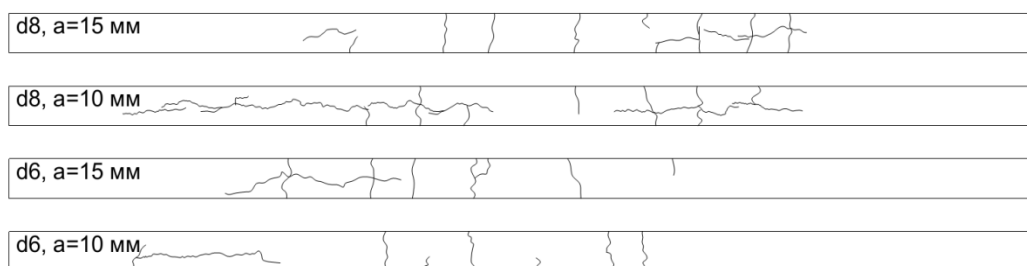


Рис. 2. Схемы расположения трещин на нижних гранях железобетонных балок в процессе испытаний

В результате испытаний балок кратковременной нагрузкой на изгиб установлен пластический тип разрушения по нормальным сечениям в зоне чистого изгиба. Потери сцепления арматуры с бетоном не зарегистрировано. Испытания арматурных стержней с коррозионными повреждениями на разрыв в испытательной машине не показали изменений механических характеристик стали по сравнению с контрольными образцами. Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что в случае питтинговой коррозии уменьшение площади поперечного сече-

ния арматуры является решающим фактором, влияющим на снижение несущей способности конструкций.

На рисунках 3–4 изображены диаграммы изменения площади поперечного сечения продольной рабочей арматуры растянутой зоны и несущей способности балок с течением времени. При изменении площади поперечного сечения арматуры диаметром 8 мм на 2,6 % за 14 месяцев и на 5,1 % за 21 месяц произошло снижение прочности балки на 2,6 % и 5,9 % соответственно. При изменении площади поперечного сече-

ния арматуры диаметром 6 мм на 5 % за 14 месяцев и на 7,8 % за 21 месяц произошло снижение прочности балки по нормальному сечению на 5,1 % и 7 % соответственно. В результате можно сделать вывод о том, что уменьшение

площади поперечного сечения арматуры в местах образования питтингов в зоне наибольшего момента изгибаемого элемента приводит к практически пропорциональному снижению несущей способности балок.

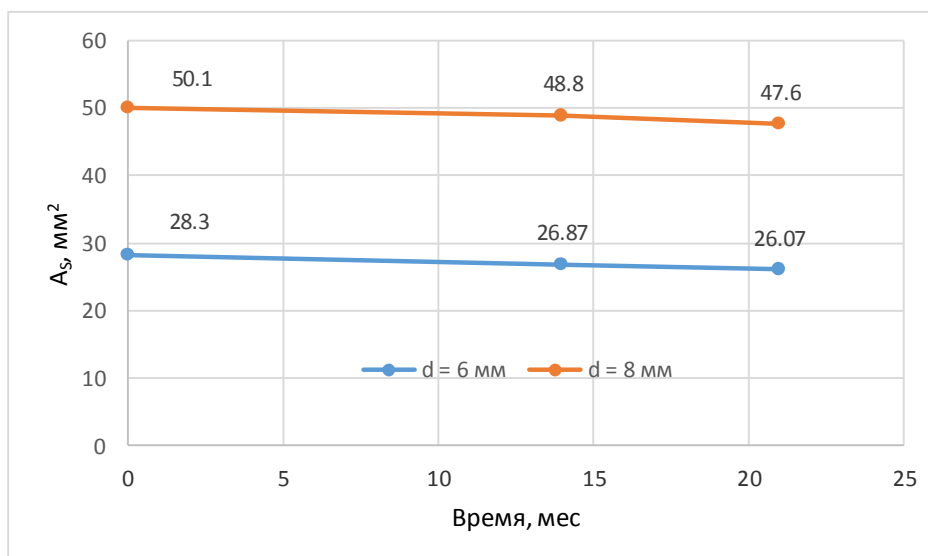


Рис. 3. Диаграмма изменения площади поперечного сечения рабочей арматуры растянутой зоны с течением времени

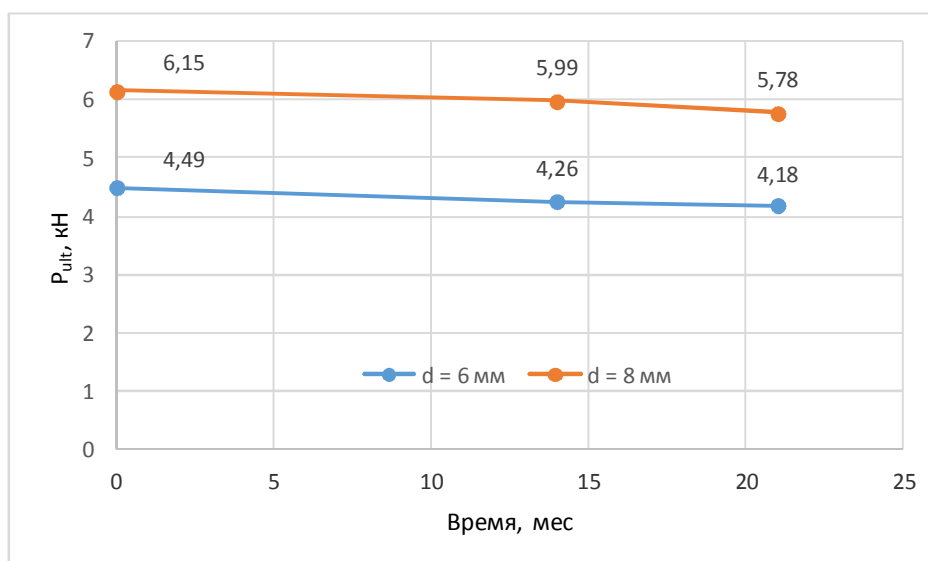


Рис. 4. Диаграмма изменения несущей способности (разрушающей нагрузки) с течением времени

Выводы. Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Питтинговая коррозия, развивающаяся в результате действия хлоридов, является наиболее опасным видом коррозии стальной арматуры в бетоне, т.к. приводит к значительным потерям площади поперечного сечения в местах образования питтингов, а, следовательно, и снижению несущей способности железобетонных конструкций с течением времени.

2. При незначительном общем объеме продуктов коррозии коррозионные трещины либо

не появляются, либо раскрываются на поздних стадиях развития повреждений, что усложняет их выявление.

3. Наличие потери сцепления арматуры с бетоном при питтинговой коррозии незначительно или отсутствует.

4. Уменьшение площади поперечного сечения арматуры в местах образования питтингов в зоне действия наибольшего момента изгибаемого элемента приводит к практически пропорциональному снижению его несущей способности балок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах. С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шисль. М.: Стройиздат, 1990. 320 с.
2. Пухонто Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен). М.: Изд. АСВ, 2004. 424 с.
3. Mangat P.S., Elgraf M.S. Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement // *ACI Structural Journal*. 1999. № 96. С. 149–159.
4. Stewart M.G. Reliability Safety Assessment of Corroding Reinforced Concrete Structures Based on Visual Inspection Information// *ACI Structural Journal*. 2010. № 107. С. 671–679.
5. Maaddawy T.E., Soudki K., Topper T. Long-Term Performance of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams // *ACI Structural Journal*. 2005. № 102. С. 649–656.
6. Du Y., Clark L., Chan A. Impact of Reinforcement Corrosion on Ductile Behavior of Reinforced Concrete Beams // *ACI Structural Journal*. 2007. № 104. С. 285–293.
7. Tachibana Y., Kajikawa Y., Kawamura M., The Mechanical Behaviour of RC Beams Damaged by Corrosion of Reinforcement // *Concrete Library of JSCE*. 1990. № 14. С. 177–188.
8. Almusallam A.A., Al-Gahtani A.S., Aziz A.R., Dakhil F.H. Effect of Reinforcement Corrosion on Flexural Behaviour of Concrete Slab // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1996. №8. С. 123–127
9. Смоляго Г.А., Дронов А.В. Исследование и анализ процессов коррозии стальной арматуры железобетонных конструкций под действием агрессивной среды // *Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.): в 7 т. Т.3 Арматура и системы армирования. Фибробетоны и армоцементы. Проблемы долговечности. Москва: МГСУ. 2014. С.415–420.*

Dronov A.V.**THE PROPERTIES OF PITTING CORROSION OF STEEL REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE BEAMS**

Two types of steel reinforcement depassivation process: carbonation of concrete and chloride penetration are considered in the article. The comparison between the corrosion due to carbonation of concrete and the chloride-induced corrosion was carried out. It was found out, that chlorides induced corrosion is potentially more dangerous than that resulting from carbonation. Method of durable tests of reinforced concrete structures under the action of the gravitational load and the corrosive chloride environment is described in the article. The results of experimental research on reinforced concrete structures with corrosive damages to steel reinforcement are given in the article. The properties of corrosion cracking in the case of the pitting corrosion were determined. The character of corrosive damage distribution along the reinforcement bars and its effect on the strength of reinforced concrete beams were determined.

Key words: *corrosion of reinforcement, pitting, strength, reinforced concrete structures.*

Дронов Андрей Васильевич, ассистент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.
E-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com