

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Железобетонные конструкции играют ключевую роль в современной инфраструктуре, однако коррозия арматуры представляет серьезную угрозу их долговечности и безопасности. В данном исследовании рассмотрена чувствительность портативного рентгенфлуоресцентного анализатора к продуктам коррозии на поверхности бетона. Эксперимент проводился с использованием бетонных образцов, содержащих различное количество гидроксида железа. Результаты показали, что рентгенфлуоресцентный анализатор демонстрирует высокую точность и надёжность в обнаружении коррозии, что способствует улучшению методов диагностики и обслуживания железобетонных конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, коррозия арматуры, рентгенфлуоресцентный анализатор, диагностика, продукты коррозии, долговечность, инфраструктура.

Введение. Железобетонные конструкции являются неотъемлемой частью современной инфраструктуры, обеспечивая прочность и надежность многих сооружений от мостов до зданий. Однако коррозия арматуры может стать серьезной угрозой для их долговечности и безопасности.

Одним из важных методов предотвращения коррозии является раннее обнаружение ее признаков. В этом контексте портативные приборы, такие как рентгенфлуоресцентный анализатор (РФА), становятся инструментом выбора для быстрой и точной оценки состояния бетонных конструкций.

Целью проведенного исследования является определение чувствительности портативного РФА спектрометра к продуктам коррозии на поверхности бетона. Для этого была проведена серия экспериментов, в ходе которых использовались образцы бетона с известным содержанием продуктов коррозии. Этот подход позволил смоделировать условия, приближенные к реальным, и оценить способность РФА обнаруживать эти продукты.

Результаты проведенного исследования представят новые данные о чувствительности РФА к продуктам коррозии в бетоне, что приводит к улучшению методов диагностирования состояния железобетонных конструкций и повышению эффективности их обслуживания и ремонта.

Обзор литературы. Количество публикаций по проблеме коррозии железобетонных конструкций и использованию портативных приборов, таких как рентгенфлуоресцентный анализатор (РФА), ограничен в настоящее время, особенно в российских источниках. Несмотря на важность этой проблемы для безопасности и долговечности инфраструктуры, недостаток исследований в этой области подчеркивает актуальность дальнейших исследований и разработок.

Среди отечественных работ можно выделить следующие. Например, в работе [1], посвященной коррозии и антикоррозионной защите железобетонных мостовых конструкций, рассматриваются вопросы совершенствования антикоррозионной защиты железобетонных мостовых конструкций и их элементов. В то время как статья [2], посвященная индустриальным методам защиты железобетонных конструкций от коррозии, описывает различные методы защиты железобетонных конструкций от коррозии, включая применение водных дисперсий полимеров винилового ряда.

Вопросы оценки остаточного ресурса железобетонных балок объекта промышленного назначения с учетом коррозионного износа рассмотрены в работе [3]. Эта статья представляет методику вероятностного расчета долговечности железобетонных

балок и ее применение к решению практической задачи оценки ресурса железобетонных конструкций с учетом коррозионного износа.

Методика оценки остаточного ресурса в зоне коррозии бетона приводится в работе [4]. В этой статье приведены анализ и причины разрушений бетонных и железобетонных элементов конструкций при карбонизации бетона.

Параметры оценки надежности железобетонных конструкций рассматриваются в работе [5]. Эта статья описывает различные методы оценки надежности железобетонных конструкций и их экспериментальное подтверждение.

В представленных работах показано место инструментальных исследований для подтверждения математических моделей, описывающих процесс коррозии, применению таких средств контроля посвящено наше исследование. Приведенная информация об использовании современных технических средств контроля подчеркивает важность международного научного сотрудничества и обмена знаниями в области коррозии железобетона и его обнаружения с помощью РФА.

Зарубежные исследования представляют результаты экспериментальных исследований и описание методик по обнаружению и оценке коррозии в железобетонных конструкциях. Применение портативного рентгенфлуоресцентного анализа (РФА) для оценки коррозии бетона является перспективной и активно изучаемой темой в области неразрушающего контроля (НК). Современные методы НК, такие как акустическая эмиссия, электрохимические и ультразвуковые методы, играют важную роль в выявлении коррозии на ранних стадиях. РФА предоставляет дополнительный уровень точности и скорости при определении химического состава и концентрации элементов в корродированном бетоне [6].

Другое исследование показало, что портативные устройства РФА могут эффективно измерять концентрации хлоридов и сульфатов на поверхности бетона. Это особенно важно, так как хлориды являются одной из главных причин коррозии арматуры в железобетоне, а сульфаты могут вызывать разрушительные химические реакции внутри бетона. Использование РФА позволяет проводить эти измерения непосредственно на объекте, что снижает затраты и ускоряет процесс анализа по сравнению с традиционными лабораторными методами. Метод также обеспечивает высокую точность при проведении многократных измерений в разных точках поверхности бетона, минимизируя ошибки анализа [7].

Таким образом, отмеченные исследования играют важную роль в понимании проблемы коррозии железобетонных конструкций и разработке методов их обнаружения и диагностики.

Во многих работах, посвященных применению средств контроля, важным разделом выступает разработка методики проведения исследований. В вопросах исследования продуктов коррозии большое внимание уделяется использованию образцов сравнения, имитирующих коррозионное состояние реальных объектов. При помощи образцов сравнения можно исследовать такие параметры, как порог чувствительности, диапазон измерения концентрации продуктов коррозии, а также воспроизводимость и точность измерений.

Теоретическое обоснование. Для анализа распространения продуктов коррозии в железобетон-

ных конструкциях применяются математические модели, основанные на дифференциальных уравнениях, отражающих изменение различных параметров. Эти модели, принимая во внимание хемогигро-термомеханические явления, объединяют физические и электрохимические процессы, которые происходят при разрушении бетона [8–11].

Процесс капиллярного переноса воды в бетоне можно описать через объемную долю влаги в его порах. Это выражается уравнением:

$$\frac{d\theta_w}{dt} = \nabla[D_w(\theta_w)\nabla\theta_w], \quad (1)$$

где θ_w — это объемная доля воды в порах бетона (объем воды на м^3 бетона); $D_w(\theta_w)$ — капиллярный коэффициент диффузии воды ($\text{м}^2/\text{с}$), зависящий от содержания влаги.

Проникновение хлорид-ионов в ненасыщенный бетон происходит за счет конвекции, диффузии, а также их химического и физического связывания с продуктами гидратации цемента [9]. Этот процесс можно описать уравнением:

$$\theta_w \frac{dC_c}{dt} = \nabla[\theta_w D_c(\theta_w, T)\nabla C_c] + D_w(\theta_w)\nabla\theta_w \nabla C_c - \frac{dC_{cb}}{dt}, \quad (2)$$

где C_c — обозначает концентрацию хлорид-ионов в поровой воде ($\text{кг}/\text{м}^3$ порового раствора), $D_c(\theta_w, T)$ — эффективный коэффициент диффузии хлоридов ($\text{м}^2/\text{с}$), который зависит от содержания воды и температуры бетона T .

Концентрация связанного хлорида C_{cb} определяется следующим уравнением:

$$\frac{dC_{cb}}{dt} = k_r(\alpha C_c - C_{cb}), \quad (3)$$

где k_r — коэффициент скорости связывания, а α — постоянная величина, равная 0,7.

Перенос кислорода до депассивации стали в бетоне описывается уравнением конвективной диффузии:

$$\theta_w \frac{dC_o}{dt} = \nabla[\theta_w D_o(\theta_w)\nabla C_o] + D_w(\theta_w)\nabla\theta_w \nabla C_o, \quad (4)$$

где C_o — концентрация кислорода в поровом растворе ($\text{кг}/\text{м}^3$), а $D_o(\theta_w)$ — эффективный коэффициент диффузии кислорода, зависящий от пористости бетона p_{con} и водонасыщенности S_w .

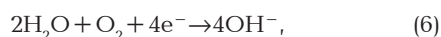
Температурное распределение в бетоне моделируется следующим уравнением, основанным на законах тепло- и массопереноса, а также сохранения энергии:

$$\lambda \nabla T + W(T) - c\rho \frac{dT}{dt} = 0, \quad (5)$$

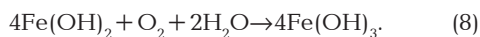
где λ — теплопроводность ($\text{Вт}/(\text{м К})$), c — удельная теплоемкость бетона ($\text{Дж}/(\text{К кг})$), ρ — плотность бетона ($\text{кг}/\text{м}^3$) и W — внутренняя тепловая мощность ($\text{Вт}/\text{м}^3$).

Коррозия стали в бетоне начинается после депассивации арматуры. Ключевые немеханические процессы, способствующие коррозии, включают перенос кислорода к поверхности стали, плотность

электрического тока через поровый раствор, а также катодный и анодный потенциалы. Потребление кислорода на катоде и аноде описывается реакциями:



что приводит к образованию гидроксид-ионов, которые движутся к аноду и реагируют следующим образом:



Плотность тока на катодной и анодной поверхностях определяется по уравнениям Батлера – Вольмера:

$$i_c = i_{0c} \frac{C_o}{C_{ob}} e^{2,3(\Phi_{oc} - \Phi)/\beta_c}, \quad (9)$$

$$i_a = i_{0a} e^{2,3(\Phi - \Phi_{0a})/\beta_a}, \quad (10)$$

где C_{ob} — концентрация кислорода на поверхности бетонного элемента ($\text{кг}/\text{м}^3$), Φ — электрический потенциал в поровом растворе у арматуры (В), i_{0c} и i_{0a} — плотности тока обмена катодной и анодной реакций ($\text{А}/\text{м}^2$), Φ_{0c} и Φ_{0a} — равновесные потенциалы катодной и анодной реакций (В), β_c и β_a — наклоны Тафеля для катодной и анодной реакций (В/дек).

Электрический ток через бетон, обусловленный движением заряженных частиц, можно выразить следующим образом, предполагая электронейтральность системы и равномерную концентрацию ионов:

$$i = -\sigma(S_w, P_{com}) \nabla \Phi, \quad (11)$$

где σ — электропроводность бетона.

Скорость образования ржавчины J_r ($\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$) и масса гидратированной красной ржавчины на арматуре m_r (кг) рассчитываются следующим образом:

$$J_r = 5,536 \cdot 10^{-7} i_a, \quad (12)$$

$$m_r = J_r \nabla t A_r, \quad (13)$$

где A_r — площадь поверхности арматуры.

Распределение продуктов коррозии (красной ржавчины) R ($\text{кг}/\text{м}^3$ порового раствора) в порах и трещинах бетона моделируется через уравнение конвективной диффузии:

$$\theta_w \frac{dR}{dt} = \nabla[\theta_w D_r \nabla R] + D_w(\theta_w) \nabla \theta_w \nabla R, \quad (14)$$

где D_r — коэффициент диффузии продукта коррозии ($\text{м}^2/\text{с}$). Уравнение описывает распределение ржавчины, образующейся в порах и трещинах бетона вследствие растворимых частиц, которые могут мигрировать и реагировать с кислородом в поровой воде [12–13].

На схеме (рис. 1) показан фрагмент железобетонной опоры с арматурным стержнем, подверженным коррозии. Этот арматурный стержень показан в проекции, на которой показано изменение его се-

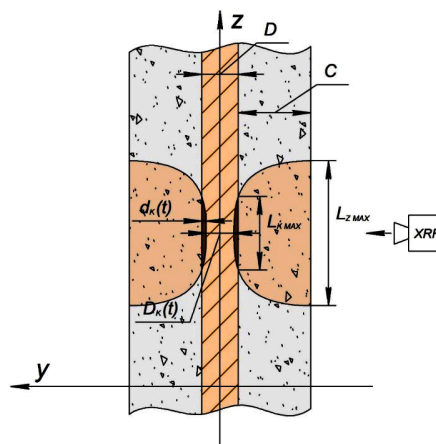


Рис. 1. Схема распространения коррозии в защитном слое арматуры

чения. На схеме приняты следующие обозначения: D — исходный диаметр арматурного стержня; c — толщина защитного слоя бетона; $D_k(t)$ — изменение диаметра арматурного стержня при коррозии; $d_k(t)$ — изменение размера продуктов коррозии в твердом состоянии вокруг арматурного стержня; $L_{kmax} = z_6 - z_5$ — наибольший линейный размер коррозионного дефекта арматуры; $L_{zmax} = z_8 - z_7$ — наибольший линейный размер продуктов коррозии на поверхности бетона. Ось OZ направлена вдоль арматурного стержня; ось OY направлена нормально к поверхности бетона и перпендикулярно оси арматурного стержня.

Таким образом, измерив, площадь продуктов коррозии на поверхности, определив концентрацию продуктов коррозии с принятыми допущениями, можно определить изменение сечения арматурного стержня. В результате проведенных исследований получены относительно простые технические средства, позволяющие средствами неразрушающего контроля определять изменения сечения арматурных стержней полых железобетонных опор, которые определяют их несущую способность. В этом случае можно воспользоваться Указаниями по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций ОАО «РЖД» [14], для которых определено снижение на 20 % сечения открытых металлических конструкций с возможностью их инструментального обследования для признания их остродефектными.

Методология. Для проведения эксперимента, подтверждающего распределение продуктов коррозии на поверхности бетона, были подготовлены образцы с заданным количеством гидроксида железа в бетоне.

Таким образом, для анализа использовались образцы с известной концентрацией продуктов коррозии в виде $\text{Fe}(\text{OH})_3$, имитирующего разложение арматурных стержней.

Образцы были изготовлены из бетона М300, который широко применяется в опорах контактной сети. В состав бетона входили следующие компоненты: цемент, песок и вода в пропорции 1:1,9:0,5, при этом не использовался щебень, который не влиял бы на качество и параметры поверхности образцов.

Для создания образцов было изготовлено 8 кубических форм размером $7 \times 6 \times 6$ см. Каждый образец был тщательно изготовлен с использованием

Таблица 1

Параметры образцов с искусственной коррозией

Номер образца	Вес образца, г	Масса добавленного $\text{Fe}(\text{OH})_3$, г	Содержание $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в образце, %
1	328,7	0	0
2	423,9	0,92	0,22
3	463,1	2,00	0,43
4	403,3	2,62	0,65
5	417,9	3,61	0,86
6	408,1	4,40	1,08
7	394,2	5,14	1,30
8	413,8	6,31	1,52

формы для обеспечения однородной формы и размеров.

Гидроксид железа был выбран в качестве добавки, поскольку он является одним из основных продуктов коррозии арматуры в бетоне. Наша цель заключалась в том, чтобы оценить чувствительность портативного прибора РФА к продуктам коррозии.

Содержание гидроксида железа и масса каждого образца приведены в таблице (табл. 1).

Этот подход к изготовлению образцов позволяет создать стандартизированные условия для дальнейшего исследования и точной оценки влияния различных концентраций продуктов коррозии на свойства бетонных конструкций.

После того как образцы бетона затвердели, мы провели их анализ с помощью портативного прибора рентгенфлуоресцентного анализа (РФА). Этот прибор, изготовленный компанией X-MET8000 Expert Geo, обладает высокой точностью и скоростью определения элементного состава материала. Мы использовали РФА для определения содержания железа в каждом образце, а также для анализа других элементов, которые могут являться показателями уровня коррозии железобетона.

X-MET8000 Expert Geo — это портативный анализатор рентгеновского флуоресцентного спектра (РФА), разработанный для быстрой и точной оценки состояния различных материалов, включая металлы, полимеры, древесину, руды, минералы и т.д. Этот прибор обладает высокой чувствительностью к легким элементам (Mg, Al, Si, P, S, Cl), низкими пределами обнаружения и высокой точностью.

X-MET8000 Expert Geo обладает высокой надежностью и простотой использования, что делает его идеальным инструментом для быстрой и точной оценки состояния бетонных конструкций.

При проведении анализа методом РФА важно обеспечить оптимальные условия, чтобы получить точные и надежные данные. Анализ проводился при комнатной температуре, так как она обеспечивает стабильные условия для работы прибора и образца. При этой температуре минимизируется влияние тепловых флуктуаций на точность измерений.

Выбор выдержки экспозиции в 30 секунд при проведении анализа обоснован стремлением к получению надежных и точных результатов анализа за минимально возможное время.

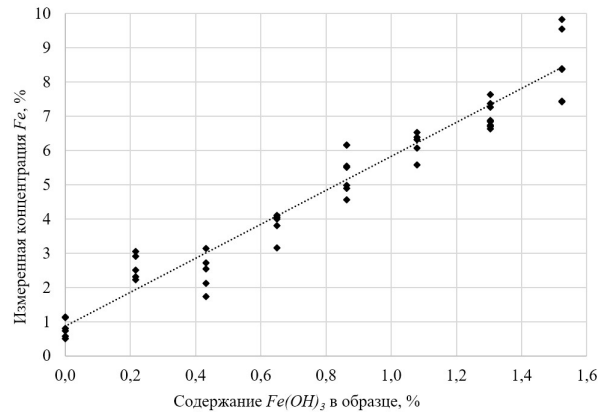


Рис. 2. Градуировочная зависимость

Первое, что следует отметить, это то, что выдержка в 30 секунд обеспечивает достаточное время для того, чтобы все элементы, присутствующие в образце, успели выйти на стабильный уровень. Этот период времени позволяет прибору стабилизироваться и достичь оптимальных условий для анализа, а также обеспечивает достаточное количество времени для регистрации сигнала от всех интересующих элементов.

Второе: более длительная выдержка может привести к увеличению времени анализа, что может быть нежелательно в практических условиях. Поэтому выбор выдержки в 30 секунд является компромиссом между получением точных результатов и эффективным использованием времени.

Таким образом, выбор выдержки в 30 секунд обусловлен стремлением к достижению оптимального баланса между точностью анализа и продолжительностью времени, необходимой для его проведения. Это позволяет получить надежные данные за короткий промежуток времени, что важно для практического применения метода РФА.

Перед анализом образцы были тщательно очищены от загрязнений и подвергнуты обработке для получения ровной поверхности. Этот процесс обеспечил однородность и однородность образцов, что существенно влияет на точность и достоверность результатов анализа. Удаление грязи и других посторонних частиц позволило избежать искажений и гарантировало чистоту данных, а обработка поверхности сделала ее более подходящей для измерений, что существенно повышает качество исследования.

Результаты. В ходе исследования мы изучали связь между концентрацией гидроксида и железа в образцах бетона, проводя измерения и анализ данных. Первым шагом было вычисление коэффициента корреляции Пирсона, который составил 0,961, указывая на сильную положительную линейную связь между концентрациями гидроксида и железа в бетоне. Это означает, что при увеличении концентрации гидроксида концентрация железа также увеличивается.

Была построена линейная регрессия по экспериментальным данным для понимания характера этой связи. Модель позволяет предсказывать концентрацию железа на основе концентрации гидроксида. Коэффициент детерминации (R^2) равен 0,937, что указывает на высокую степень соответствия данных. Около 93,7% вариации концентрации железа объясняется изменениями концентрации гидроксида.

да, что свидетельствует о высокой точности анализа и его пригодности для диагностики железобетонных конструкций.

В заключение: результаты важны для строительства и обслуживания инфраструктуры. Метод рентгенфлуоресцентного анализа (РФА) показал высокую чувствительность к концентрации гидроксида железа в бетоне, что позволяет определять уменьшение сечения арматуры. Мобильные инструментальные средства определения концентрации продуктов коррозии повышают качество диагностики, способствуют своевременному обслуживанию железобетонных конструкций, увеличивая их долговечность и безопасность.

Библиографический список

1. Кондрашов Г. М. Современные методы защиты железобетонных конструкций от коррозии с использованием электрофизического эффекта // *Фундаментальные исследования*. 2008. № 9. С. 65–66. EDN: JUCNBVJ.
2. Овчинникова Т. С., Маринин А. Н., Овчинников И. Г. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // *Вестник евразийской науки*. 2014. № 5 (24). С. 11–36. EDN: TKELFZ.
3. Пшеничкина В. А., Гриценко Б. С., Глухов А. В. [и др.]. Оценка остаточного ресурса железобетонных балок объекта промышленного назначения с учетом коррозионного износа // *Вестник МГСУ*. 2023. № 4. С. 533–544. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.533-544. EDN: DBLSYW.
4. Жохов Е. И., Фурсов Л. Ф. Оценка остаточного ресурса в зоне коррозии бетона // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4-4. С. 118–123. EDN: RTSDVV.
5. Поджарова К. Д., Быкова А. С., Рыба Н. С. [и др.]. Оценка надежности железобетонных конструкций /8/ *Московский экономический журнал*. 2019. № 5. С. 337–344. EDN: PZABXK.
6. Zaki A., Chai H. K., Aggelis D. G. [et al.]. Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique // *Sensors*. 2015. Vol. 15 (8). P. 19069–19101. DOI: 10.3390/s150819069.
7. Altoubat S., Maalej M., Shaikh F. U. A. Laboratory Simulation of Corrosion Damage in Reinforced Concrete // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2016. Vol. 10 (3). P. 383–391. DOI: 10.1007/s40069-016-0138-7.
8. Ožbolt J., Balabanić G., Oršanić F. Modelling corrosion of steel reinforcement in concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2019. Vol. 615 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/615/1/012011.
9. Andrade C. Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modeling // *Materials and Structures*. 2018. Vol. 52 (2). P. 1–26. DOI: 10.1617/s11527-018-1301-1.
10. Леонович С. Н., Степанова А. В. Деформирование и разрушение железобетонных конструкций: моделирование в условиях хлоридной коррозии // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт*. 2012. № 1 (24). С. 81–83. EDN: UWTPCX.
11. Бенин А. В., Семенов А. С., Семенов С. Г. [и др.]. Конечно-элементное моделирование процессов разрушения и оценка ресурса элементов автодорожного моста с учётом кор-

розионных повреждений // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 7. С. 32–42. EDN: PHGQPP.

12. Волчанин Г. В., Кузнецов А. А., Пономарев А. В. Обнаружение и количественная оценка коррозии на поверхности железобетона с помощью анализа изображений // *Приборы*. 2023. № 6 (276). С. 35–42. EDN: JFZKIT.

13. Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Фомиченко К. И., Запрудский А. А. Исследование процесса коррозии железобетонных опор контактной сети с оценкой параметров прочности // *Известия Транссиба*. 2020. № 2 (42). С. 26–34. EDN: CDUVOI.

14. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 18.04.2022 № 1047/р (ред. от 19.01.2023 № 91/р). Москва, 2023. 80 с.

ФОМИЧЕНКО Кирилл Игоревич, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск.

SPIN-код: 5140-4206

AuthorID (РИНЦ): 1118770

ORCID: 0000-0001-5836-2395

AuthorID (SCOPUS): 57223102995

ResearcherID: JLL-8215-2023

Адрес для переписки: fomichenko.kiril@gmail.com

ВОЛЧАНИН Георгий Викторович, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

ORCID: 0000-0003-2765-9617

Адрес для переписки: vev_7@bk.ru

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

ORCID: 0000-0002-1815-4679

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

КУЗЬМЕНКО Антон Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника» ОмГУПС, г. Омск.

SPIN-код: 3897-7011

AuthorID (РИНЦ): 1013551

Адрес для переписки: kuzo17@yandex.ru

Для цитирования

Фомиченко К. И., Волчанин Г. В., Кузнецов А. А., Кузьменко А. Ю. Экспериментальные исследования количественного состава продуктов коррозии на поверхности железобетонных конструкций // *Омский научный вестник*. 2024. № 3 (191). С. 150–156. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-150-156.

Статья поступила в редакцию 17.06.2024 г.

© К. И. Фомиченко, Г. В. Волчанин,

А. А. Кузнецов, А. Ю. Кузьменко

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE QUANTITATIVE COMPOSITION OF CORROSION PRODUCTS ON THE SURFACE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Reinforced concrete structures play a key role in modern infrastructure, however, corrosion of reinforcement poses a serious threat to their durability and safety. In this study, the sensitivity of a portable X-ray fluorescence analyzer (XRF) to corrosion products on the concrete surface is considered. The experiment was conducted using concrete samples containing varying amounts of iron hydroxide. The results showed that the FRA demonstrates high accuracy and reliability in detecting corrosion, which contributes to the improvement of diagnostic methods and maintenance of reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete structures, reinforcement corrosion, X-ray fluorescence analyzer, diagnostics, corrosion products, durability, infrastructure.

References

1. Kondrashov G. M. Sovremennyye metody zashchity zhelezobetonnnykh konstruktsey ot korrozii s ispol'zovaniyem elektrofizicheskogo effekta [Modern Methods of Protecting Reinforced Concrete Structures from Corrosion Using Electro-Physical Effects] // *Fundamental'nye Issledovaniya. Fundamental Research*. 2008. No. 9. P. 65–66. EDN: JUCNBJ. (In Russ.).
2. Ovchinnikova T. S., Marinin A. N., Ovchinnikov I. G. Korroziya i antikorroziionnaya zashchita zhelezobetonnnykh mostovykh konstruktsey [Corrosion and corrosion protection of reinforced concrete bridge structures] // *Vestnik Evraziyskoy Nauki. Bulletin of Eurasian Science*. 2014. No. 5 (24). P. 11–36. EDN: TKELFZ. (In Russ.).
3. Pshenichkina V. A., Gritsenko B. S., Glukhov A. V. [et al.]. Otsenka ostatochnogo resursa zhelezobetonnnykh balok ob"yekta promyshlennogo naznacheniya s uchedom korroziionnogo iznosa [Estimation of the residual service life of reinforced concrete beams of an industrial facility taking into account corrosion wear] // *Vestnik MGSU. Vestnik MGSU*. 2023. No. 4. P. 533–544. EDN: RTSDVV. (In Russ.).
4. Zhokhov E. I., Fursov L. F. Otsenka ostatochnogo resursa v zone korrozii betona [Residual resource of concrete inside the limit of corrosion zone] // *Vestnik MGSU. Vestnik MGSU*. 2010. No. 4-4. P. 118–123. EDN: RTSDVV. (In Russ.).
5. Podzharova K. D., Bykova A. S., Ryba N. S. [et al.]. Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnnykh konstruktsey [Assessment of the reliability of reinforced concrete structures] // *Moskovskiy Ekonomicheskiy Zhurnal. Moscow Economic Journal*. 2019. No. 5. P. 337–344. EDN: PZABXK. (In Russ.).
6. Zaki A., Chai H. K., Aggelis D. G. [et al.]. Non-Destructive Evaluation for Corrosion Monitoring in Concrete: A Review and Capability of Acoustic Emission Technique // *Sensors*. 2015. Vol. 15 (8). P. 19069–19101. DOI: 10.3390/s150819069. (In Engl.).
7. Altoubat S., Maalej M., Shaikh F. U. A. Laboratory Simulation of Corrosion Damage in Reinforced Concrete // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2016. Vol. 10 (3). P. 383–391. DOI: 10.1007/s40069-016-0138-7. (In Engl.).
8. Ožbolt J., Balabanić G., Oršanić F. Modelling corrosion of steel reinforcement in concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2019. Vol. 615 (1). DOI: 10.1088/1757-899X/615/1/012011. (In Engl.).
9. Andrade C. Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modeling // *Materials and Structures*. 2018. Vol. 52 (2). P. 1–26. DOI: 10.1617/s11527-018-1301-1. (In Engl.).
10. Leonovich S. N., Stepanova A. V. Deformirovaniye i razrusheniye zhelezobetonnnykh konstruktsey: modelirovaniye v usloviyakh khloridnoy korrozii [Deformation and destruction of reinforcement structures: modeling in condition of chlorine corrosion] // *Vestnik Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Transporta: Nauka i Transport. Bulletin of Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2012. No. 1 (24). P. 81–83. EDN: UWTPCX. (In Russ.).
11. Benin A. V., Semenov A. S., Semenov S. G. [et al.]. Konechno-elementnoye modelirovaniye protsessov razrusheniya i otsenka resursa elementov avtodorozhnogo mosta s uchedom korroziionnykh povrezhdeniy [Finite element modeling of fracture processes and estimation of the road with account of corrosion damage] // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 7. P. 32–42. (In Russ.).
12. Volchanin G. V., Kuznetsov A. A., Ponomarev A. V. Obnaruzheniye i kolichestvennaya otsenka korrozii na poverkhnosti zhelezobetona s pomoshch'yu analiza izobrazheniy [Detection and quantification of corrosion on reinforced concrete surfaces using image analysis] // *Pribory. Instruments*. 2023. No. 6 (276). P. 35–42. EDN: JFZKIT. (In Russ.).

13. Kuznetsov A. A., Ponomarev A. V., Fomichenko K. I., Zaprudskiy A. A. Issledovaniye protsessa korrozii zhelezobetonykh opor kontaktnoy seti s otsenkoy parametrov prochnosti [Analysis of corrosion process in reinforced concrete structures with strength parameters estimation] // Izvestiya Transsiba. *The Journal of Transsib Railway Studies*. 2020. No. 2 (42). P. 26–34. EDN: CDUVOI. (In Russ.).

14. Ukazaniya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu opornykh konstruktivnykh kontaktnoy seti. Utv. Rasporyazheniyem OAO «RZhD» ot 18.04.2022 № 1047/r (red. ot 19.01.2023 № 91/r) [Guidelines for Maintenance and Repair of Support Structures of the Contact Network. Approved by the Order of OJSC «RZD» dated 18.04.2022 No. 1047/r (ed. dated 19.01.2023 No. 91/r). Moscow, 2023. 80 p. (In Russ.).

FOMICHENKO Kirill Igorevich, Graduate Student of Theoretical Electrical Engineering Department, Omsk State Transport University (OSTU), Omsk.

SPIN-code: 5140-4206

AuthorID (RSCI): 1118770

ORCID: 0000-0001-5836-2395

AuthorID (SCOPUS): 57223102995

ResearcherID: JLL-8215-2023

Correspondence address: fomichenko.kiril@gmail.com

VOLCHANIN Georgiy Viktorovich, Graduate Student of Theoretical Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

ORCID: 0000-0003-2765-9617

Correspondence address: vev_7@bk.ru

KUZNETSOV Andrey Albertovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Theoretical Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 5259-0531

AuthorID (RSCI): 358976

ORCID: 0000-0002-1815-4679

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Correspondence address: kuznetsovaa.omgups@gmail.com

KUZMENKO Anton Yurievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Theoretical Electrical Engineering Department, OSTU, Omsk.

SPIN-code: 3897-7011

AuthorID (RSCI): 1013551

Correspondence address: kuzo17@yandex.ru

For citations

Fomichenko K. I., Volchanin G. V., Kuznetsov A. A., Kuzmenko A. Yu. Experimental studies of the quantitative composition of corrosion products on the surface of reinforced concrete structures // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 3 (191). P. 150–156. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-150-156.

Received June 17, 2024.

© K. I. Fomichenko, G. V. Volchanin,

A. A. Kuznetsov, A. Yu. Kuzmenko