



# ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 629.064.5:543.423

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-160-164

А. А. КУЗНЕЦОВ

А. С. БРЮХОВА

Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье рассматриваются процессы возникновения коррозии в железобетонных опорах контактной сети и описаны реакции, сопровождающие коррозию стальной арматуры. Описан эксперимент электрохимической коррозии изготовленных образцов с различной степенью коррозии стальной арматуры. Проведен спектральный анализ для определения количественного содержания продуктов коррозии на поверхности бетона. Результаты анализа подтвердили зависимость концентрации продуктов коррозии на поверхности бетона с выносом металла из объема стальной арматуры. Получена градуировочная зависимость определения железа на поверхности бетона. Сделаны выводы о возможности применения мобильных спектроанализаторов совместно с представленной методикой.

**Ключевые слова:** железобетонные опоры контактной сети, продукты коррозии, поверхность образцов, диагностирование коррозионного состояния, градуировочная зависимость, спектральный анализ.

Основным видом опор при прокладке воздушных линий электропередач и контактной сети для подвески проводов являются железобетонные опоры (95 %) от общего их количества. Надежность опор определяет бесперебойность электроснабжения и безопасность движения поездов. Известно, что тяжелая железобетонная опора способна повалить весь анкерный пролет, и поэтому контроль их состояния позволяет предупредить аварии и избежать больших затрат на восстановление и простой участка железнодорожного пути.

Для диагностирования коррозионного состояния в настоящее время используются различные мето-

ды контроля, среди которых наиболее распространены: метод с откопкой и последующим визуальным осмотром, акустический и электрохимический. Недостаток метода с откопкой — трудоемкость и малоэффективность; недостатком акустического и электрохимического методов является измерение косвенных величин, связанных с коррозионным состоянием функциональными зависимостями.

В работе предложен прямой анализ продуктов коррозии на поверхности железобетонных конструкций. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающих возможность применения спектральных методов контроля. Пер-

Значения параметров образцов

Номер образца	Масса насыщенного образца, $m$ , кг	Масса ненасыщенного образца, $m$ , кг	Объем образца, $V$ , $m^3$	Плотность насыщенного образца, $\rho$ , $кг/м^3$	Плотность ненасыщенного образца, $\rho_0$ , $кг/м^3$	Пористость $P_{общ}$ , %
1	2,551	2,488	0,987	2,585	2,521	2,5
2	2,455	2,377	0,931	2,637	2,553	3
4	2,404	2,357	0,987	2,436	2,388	1,9
3	1,865	1,721	0,720	2,590	2,390	7,7

спективной выполненными исследованиями является применение мобильных спектроанализаторов совместно с методикой, приведенной в работе.

**Причины возникновения коррозии стальной арматуры.** Аварии случаются при утере несущей способности опоры, причинами которой являются трещины, заводские дефекты и коррозионные разрушения. Бетон имеет щелочную среду с  $pH = 11,5 - 12,5$ , иногда больше. При этом стальная арматура находится в пассивном состоянии, то есть устойчива к щелочной среде, потенциал стали находится в положительной области, и окисление не происходит. Однако из-за того, что подземная часть опоры находится в условиях повышенной влажности и имеет доступ кислорода к арматуре, за счет пористости бетона возникает коррозия арматуры, которая носит электрохимический характер. В качестве электролита выступает пористый слой бетона, заполненный водой и кислородом. А за счет блуждающих токов и токов утечки скорость реакции возрастает.

Бетон по своей структуре пористый материал и может активно впитывать влагу и воздух из окружающей среды.

Пористость связана со степенью наполненности общего объема материала воздухом. Причина возникновения пор заключается в соблюдении технологии изготовления и качества компонентов бетона. При процессе затвердевания некоторое количество воды химически связывается с минералами цемента, а оставшаяся часть воды испаряется, вследствие чего образуются поры. Значение пористости можно определить, зная массу влажного и просушенного бетонного образца. В работе вычислялась общая пористость образцов в объеме бетона  $P_{общ}$ , %, по выражению (1) [1, 2]:

$$P_{общ} = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \cdot 100, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — плотность не насыщенного водой образца,  $[кг/м^3]$ ;  $\rho$  — плотность насыщенного образца,  $[кг/м^3]$ .

Для проведения эксперимента были подготовлены 4 образца бетона с различной пористостью и искусственными дефектами размером  $60 \times 60 \times 200$ , со стержнем арматуры диаметром 10 мм. Значения параметров образцов и значения пористости представлены в табл. 1.

Пористость бетона напрямую влияет на коррозионную стойкость арматуры, находящейся внутри бетона. Коррозионная стойкость самый важный

параметр железобетонных опор контактной сети, который влияет на долговечность и надежность опор.

Коррозия в работе рассматривалась как электрохимический процесс, происходящий за счет взаимодействия воды и кислорода, где основные окислительно-восстановительные реакции могут быть описаны уравнениями (2) и (3), представляющие анодное окисление железа и катодное восстановление меди соответственно. Общая реакция представлена уравнением (4), здесь  $Fe(OH)_2$  является одним из нескольких возможных продуктов коррозии в зависимости от окружающей среды [3, 4].

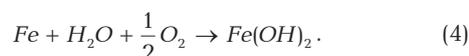
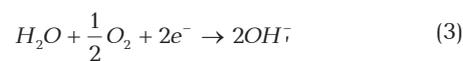


Схема протекания процесса коррозии железобетона представлена ниже на рис. 1. После разрушения пассивного слоя формируется точка с растворением железа протекает в соответствии с уравнением (3). Электроны переносятся от анода к катоду (электронный ток), где происходит восстановление кислорода согласно уравнению (4).

Изображение расположения слоев на поверхности арматурного стержня в результате возникновения процесса коррозии внутри железобетонного образца схематично представлено на рис. 2.

Изготовленные образцы с рассчитанной ранее напористостью были подвержены электрокоррозии путем помещения в водный раствор электролита

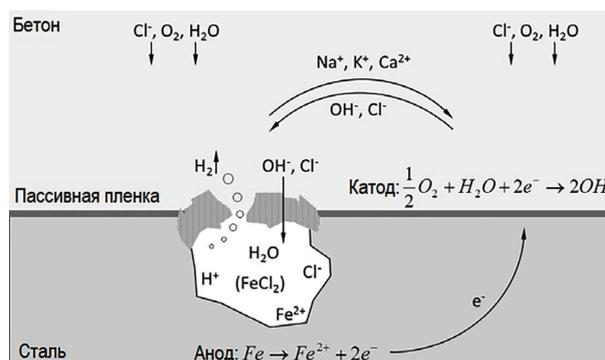


Рис. 1. Схематичное изображение процесса коррозии

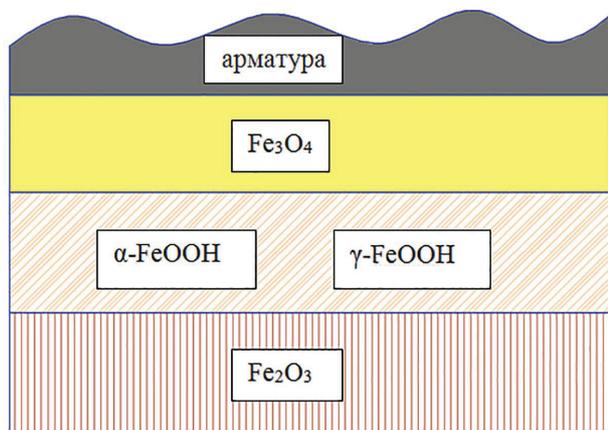


Рис. 2. Слои продуктов коррозии на поверхности углеродистой стали

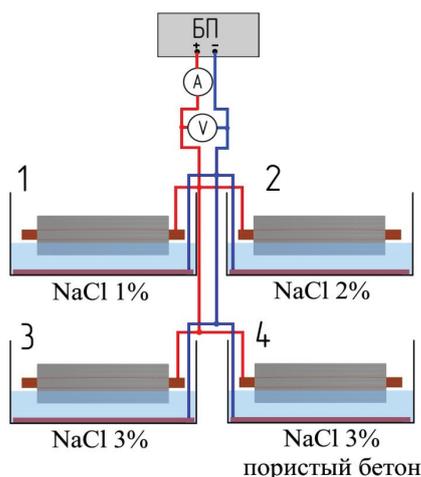


Рис. 3. Схема установки для исследования процесса электрокоррозии

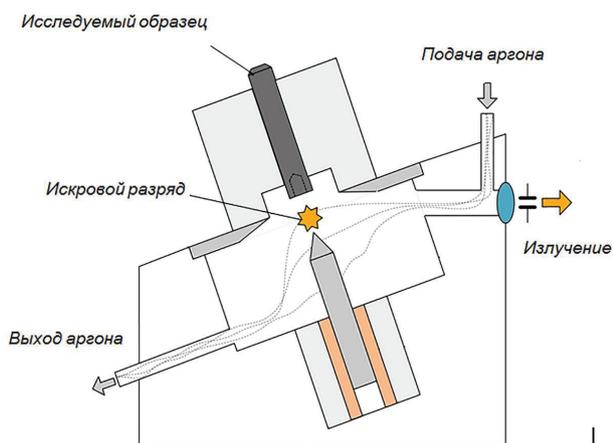


Рис. 4. Схема анализа графитовых стержней на спектрометре «Аргон-5СФ»

с различной концентрацией NaCl и подключением к внешнему источнику напряжения. Электрохимическая коррозия арматуры может усилиться токами утечки или блуждающими токами от электрифицированного рельсового транспорта [5–7]

Место стекания электрического тока с арматуры является анодом. На нем происходит окисление

Таблица 2

Таблица значений интенсивности углерода и линии сравнения

Номер образца	Отличительный признак	$I_{Fe}$	$I_C$	$I_{отн}$
1	1 %	1118252	4979994	0,225
2	2 %	2964327	3576839	0,829
3	3 %	1172748	759444	1,544
4	3 % с повышенной пористостью	1460473	598319	2,441
5	Ржавчина	4244541	3272797	1,297
6	Бетон	771789	3350958	0,230
7	Клей	67166	3647528	0,018
8	Графит	48344	5942766	0,008

железа. В слое бетона, выполняющего роль электролита, насыщенного различными ионами, будет проходить электролиз. Подобный механизм электрокоррозии происходит в грунте под действием блуждающих токов [8–10].

Каждый образец был помещен в раствор хлорида натрия (рис. 3), в качестве анода выступала стальная арматура, а в качестве катода — медная пластина, которые были подключены к внешнему источнику напряжения.

Образцы 1, 2 и 3 были помещены в одно-, двух- и трехпроцентные растворы хлорида натрия, образец 4 был также помещен в трехпроцентный раствор, но имел пористую структуру бетона. Напряжение, приложенное ко всем четырем образцам, было одинаковым, а ток различный, что объясняется разной концентрацией растворов электролита и пористостью. Электролиз происходил на протяжении 30 часов.

По завершению электролиза на поверхности бетона были обнаружены следы коррозии, что свидетельствует о разложении стальных стержней арматуры.

С поверхностей образцов, участвующих в электролизе, был снят верхний слой бетона, полученные порошки были помещены в кратеры графитовых электродов и залиты связующим клеем. Кроме того были подготовлены образцы, содержащие только ржавчину, чистый бетон, и чистый электрод с клеем и без него.

Для всех исследуемых электродов был проведен спектральный анализ на эмиссионном спектрометре «Аргон-5СФ» (рис. 4). Режим работы спектрометра: продувка — 10 с; обжиг — 1 с; экспозиция — 10 с; спектральный диапазон 170–400 нм; спектральное разрешение 0,03 нм; частота поджигающих импульсов — 200 Гц; количество приемников излучения CCD — 6.

Представлены численные значения интенсивностей спектральных линий железа (275,574 нм), углерода (193,090 нм), а также относительная интенсивность для исследуемых образцов (табл. 2).

Полученные спектры, наложенные друг на друга, при различной степени коррозии (рис. 5).

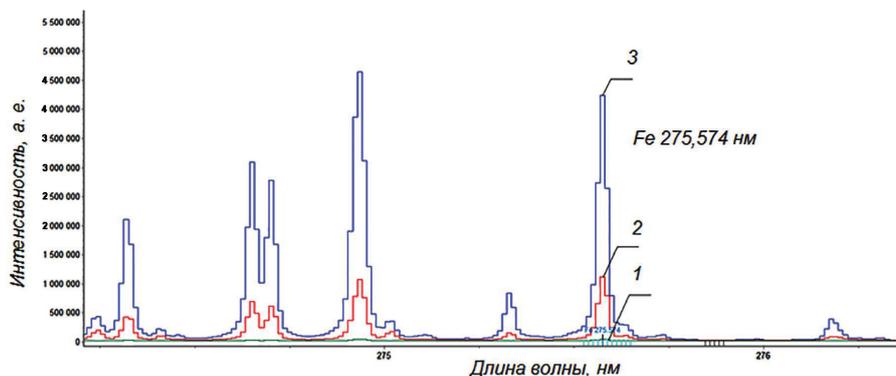


Рис. 5. Спектральные линии трех образцов с различной степенью коррозии: 1 — чистый графит; 2 — среднее содержание коррозии в бетоне; 3 — ржавчина

Далее по полученным значениям интенсивностей был построен градуировочный график для определения количественного содержания хлорида железа ( $\text{FeCl}_3$ ) (рис. 6). По полученной градуировочной зависимости возможно определение продуктов коррозии арматурных стержней в тонкотельных железобетонных конструкциях с их выходом на поверхность. Основным элементом для определения является железо в виде оксидов, гидроксидов и других его соединений, образующих продукты коррозии.

В качестве зависимости, построенной методом наименьших квадратов, использован полином второй степени. Коэффициент детерминации принял значение 0,958.

#### Выводы

1. Для определения степени коррозии реальных объектов были подготовлены образцы армированного железобетона с различной степенью коррозии, полученной при варьировании параметров среды и различным воздействием электрического тока.

2. Выполнен спектральный анализ химического состава на поверхности бетона различных образцов. Представлены спектрограммы образцов с различным количественным содержанием элементов на поверхности (Fe, Cl, Na). Предложена методика исследования для спектрометра «Аргон-5СФ».

3. Показана корреляция содержания продуктов коррозии на поверхности с количеством металла, вышедшего из объема арматурных стержней, находящихся внутри железобетонных образцов.

4. Градуировочный график, построенный по образцам с различным содержанием хлорида железа, имеет высокую степень корреляции зависимости интенсивность железа — концентрация ( $R^2 = 0,958$ ).

Проведены испытания и предложена методика для определения количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий. Определены направления дальнейших исследований для оценки коррозионного состояния арматуры по результатам испытаний на поверхности бетона.

#### Библиографический список

1. Алексеев С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1968. 231 с.
2. ГОСТ 12730.4–78. Бетоны. Методы определения показателей пористости. Введ. 01–01–1980. М.: Стандартинформ, 2007. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901707640> (дата обращения: 22.01.2018).

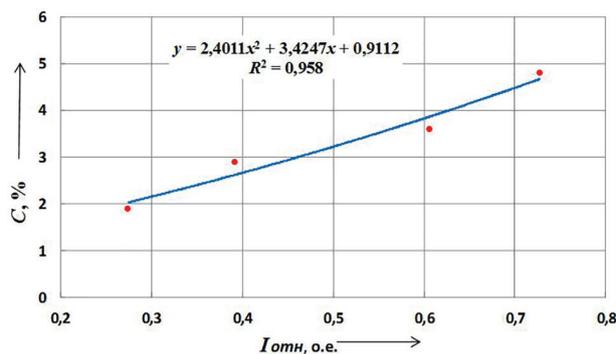


Рис. 6. Градуировочный график определения железа на поверхности бетона с добавками  $\text{FeCl}_3$

3. Румянцева В. Е., Коновалова В. С. Влияние хлоридов на защитные способности бетона в железобетонных конструкциях // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. SMARTEX-2015: сб. материалов XVIII Междунар. науч.-практ. форума. Иваново: ИВГПУ, 2015. С. 301–304.

4. Подольский В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкция, эксплуатация, диагностика // Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2007. 152 с.

5. Millar S., Wilsch G., Eichler T. [et al.]. Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen — automatisierte Baustoffanalyse // Beton- und Stahlbetonbau. 2015. Vol. 110 (8). P. 501–510. DOI: 10.1002/best.201500030.

6. Кремерс Д. А., Радзиемски Л. И. Лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия / пер. с англ. А. А. Горбатенко [и др.]; под ред. Н. Б. Зорова. М.: Техносфера, 2009. 360 с. ISBN 978-5-94836-235-9.

7. Кузнецов А. А., Пономарев А. В., Мешкова О. Б., Бучельникова О. С. Возможности приборов ЛИЭС для определения коррозионного состояния железобетонных конструкций при длительной эксплуатации // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 12 (4). С. 610–615.

8. Лабутин Т. А., Попов А. М., Райков С. Н. [и др.]. Определение хлора в бетонах на воздухе методом лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии // Журнал прикладной спектроскопии. 2013. Т. 80, № 3. С. 325–329.

9. Шлюкер С. Поверхностно-усиленная Рамановская спектроскопия (SERS): аналитические, биофизические и биомедицинские приложения: моногр. / под ред. С. Шлюкера. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2017. 331 с.

10. Пат. 2460062 Российская Федерация, МПК G 01 N 21/88. Способ определения коррозионного состояния подземной части железобетонных опор линий электропередач и кон-

тактной сети / Кандаев В. А., Авдеева К. В., Никифоров М. А. № 2011100389/28; заявл. 11.01.11; опубл. 27.08.12. Бюл. № 24.

**БРЮХОВА Анна Сергеевна**, аспирантка кафедры «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: annaivan29@gmail.com

#### Для цитирования

Кузнецов А. А., Брюхова А. С. Определение количественного содержания продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий // Омский научный вестник. 2018. № 6 (162). С. 160–164. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-160-164.

Статья поступила в редакцию 29.10.2018 г.

© А. А. Кузнецов, А. С. Брюхова

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

SPIN-код: 5259-0531

AuthorID (РИНЦ): 358976

AuthorID (SCOPUS): 56824984500

Адрес для переписки: KuznetsovAA@omgups.ru

УДК 621.382

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-164-168

**А. И. БЛЕСМАН<sup>1</sup>**  
**Р. Б. БУРЛАКОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

<sup>2</sup>Омский государственный  
университет им. Ф. М. Достоевского,  
г. Омск

## СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕМЕНТА, ОСНОВАННОГО НА ДВУХ КОНТАКТАХ Al-p-Si И Ti-p-Si С БАРЬЕРОМ ШОТКИ

Задачей исследований является разработка структуры и способа изготовления фотоэлемента, способного принимать излучение либо в ближней инфракрасной области спектра (1–1,4) мкм, либо в области (0,5–1,4) мкм. Рассмотрены способ изготовления и результаты исследования фотоэлектрических характеристик двухспектрального фотоэлемента, основанного на двух контактах с барьером Шоттки Al-p-Si и Ti-p-Si, расположенных на противоположных сторонах Si пластины. Показано, что удаление нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины ведет к значительному увеличению напряжения холостого хода и тока короткого замыкания контакта Al-p-Si, расположенного на этой поверхности и освещаемого через кремниевую пластину.

**Ключевые слова:** способ изготовления фотоэлемента, кремний *p*-типа, контакты с барьером Шоттки.

**Введение.** Развитие систем, использующих оптические методы передачи информации, предусматривает использование различного рода фотоприемников. В таких системах обычно используются фоторезисторы и фотодиоды [1]. При этом электронно-оптические системы используют один оптический канал, который обеспечивает регистрацию оптического излучения одной длины волны или интегрального потока излучения в некотором спектральном диапазоне, что создает ряд трудностей при приеме оптического излучения в условиях оптических помех в области рабочих длин волн.

Изложенные в этой работе исследования направлены на разработку способа изготовления фотоэлемента, способного обеспечить прием излучения рабочей длины волны в ближней инфракрасной области спектра при наличии по-

мех видимого диапазона длин волн при сохранении способности фотоэлемента принимать излучение как в видимой, так и в ближней инфракрасной областях спектра. Решение этой задачи заключается в применении двухспектрального фотоэлемента, представляющего собой оптоэлектронный прибор, работающий одновременно в двух спектральных диапазонах. В этом двухспектральном фотоэлементе, который освещается с одной стороны, используются один омический контакт и два контакта с барьером Шоттки, расположенные на противоположных сторонах Si пластины *p*-типа: контакт Al-*p*-Si, действующий на основе внутренней фотоэмиссии горячих электронов из металлической пленки в полупроводник в ближней инфракрасной области спектра при освещении через кремниевую подложку, и контакт Ti-*p*-Si, освещаемый со стороны полупрозрачного слоя Ti.