

УДК 629.064.5:543.423

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
КОРРОЗИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР КОНТАКТНОЙ
СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

*Кузнецов Андрей Альбертович, д.т.н., профессор, ОмГУПС, Россия, 644046, г. Омск,
проспект Карла Маркса, 35. Тел: (3812) 31-06-88, e-mail: kuznetsova.a.omgups@gmail.com
Запрудский Александр Алексеевич, к.т.н., доцент, ОмГУПС, Россия, 644046, г. Омск,
проспект Карла Маркса, 35. Тел: (3812) 31-06-88*

Брюхова Анна Сергеевна, аспирант, ОмГУПС, Россия, 644046, г. Омск, проспект Карла Маркса, 35. Тел: (3812) 31-06-88, e-mail: annaivan29@gmail.com

Фомиченко Кирилл Игоревич, студент, ОмГУПС, Россия, 644046, г. Омск, проспект Карла Маркса, 35. Тел: (3812) 31-06-88

Аннотация. В статье рассматриваются процессы возникновения коррозии в железобетонных опорах контактной сети и описаны реакции, сопровождающие коррозию стальной арматуры. Описан эксперимент электрохимической коррозии арматуры. Изготовлены образцы с различной степенью коррозии стальной арматуры. Для задания требуемых свойств изменяли концентрацию водного раствора электролита, ускоряющего процесс коррозии. Изменение степени коррозии исследовали при пропускании электрического тока в системе анод – катод. В качестве анода выступала стальная арматура, а в качестве катода – медный электрод. В эксперименте участвовали образцы с различной пористостью бетона. Дополнительно выполнялась имитация трещин, возникающих при эксплуатации и ускоряющих процесс коррозии. Проведен рентгено-графический контроль стальной арматуры, находящейся в бетоне, определено количество железа, вышедшего на поверхность бетона. Выполнен анализ графических изображений рентгеновских снимков и дана количественная оценка изменения поперечного сечения стержней стальной арматуры до и после воздействия влияющих факторов. 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. Сделаны выводы о возможности применения мобильных спектроанализаторов совместно с представленной методикой.

Ключевые слова: железная дорога, железобетон, арматура, контактная сеть, коррозия, диагностирование, рентгенография, спектральный анализ, интенсивность, спектр.

IMPROVEMENT IN DIAGNOSTICS TECHNOLOGY OF CATENARY CORROSION CONDITION OF RAILWAYS

Kuznetsov Andrey, doctor of technical science, professor, 644046, Russia, Omsk, Omsk State Transport University. Phone: (3812) 31-06-88, e-mail: kuznetsova.a.omgups@gmail.com

Zaprudskiy Alexandr, candidate of technical science, Associate Professor, 644046, Russia, Omsk, Omsk State Transport University. Phone: (3812) 31-06-88

Bryukhova Anna, post-graduate student, 644046, Russia, Omsk, Omsk State Transport University. Phone: (3812) 31-06-88, e-mail: annaivan29@gmail.com

Fomichenko Kirill, student, 644046, Russia, Omsk, Omsk State Transport University. Phone: (3812) 31-06-88

Annotation. The article deals with the processes of corrosion in the reinforced concrete supports of the catenary and describes the reactions accompanying corrosion of steel reinforcement. The experiment of electrochemical corrosion of reinforcement is described. Samples with different corrosion degree of steel reinforcement are made. To set the required properties, the concentration of the aqueous electrolyte solution accelerating the corrosion process was changed. The change in the degree of corrosion was investigated by passing an electric current in the anode – cathode system. The anode was steel reinforcement and the cathode was a copper electrode. The experiment involved samples with different porosity of concrete. In addition, the simulation of cracks that occur during operation and accelerate the corrosion process was performed. The x-ray graphic control of steel reinforcement in concrete was carried out, the amount of iron that came to the surface of concrete was determined. The analysis of graphic images of X-ray images is analyzed and the quantitative estimation of the change in the cross-section of the steel reinforcement rods before and after the influence of the influencing factors is given. Spectral analysis was performed to determine the

quantitative content of corrosion products on the concrete surface. The analysis results confirmed the dependence of the corrosion products concentration on the concrete surface with the removal of metal from the steel reinforcement volume. Conclusions are made about the possibility of using mobile spectral analyzer in conjunction with the presented methodology.

Keywords: railway, reinforced concrete, reinforcement, catenary, corrosion, diagnosis, X-ray radiography, spectral analysis, intensity, spectrum.

Введение

При прокладке воздушных линий электропередач и контактной сети для подвески проводов используются железобетонные опоры. Основным видом опор контактной сети являются железобетонные (95%) от общего 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 методы контроля, среди которых наиболее распространены акустические и электрохимические. Недостатком таких 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. Перспективой выполненных исследований 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 $\text{pH} = 12\text{--}13$, 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 условии 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 $P_{\text{общ}}$, %, по выражению (1):

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

где ρ_0 – плотность не насыщенного водой образца, $[\text{кг}/\text{м}^3]$; ρ – плотность насыщенного образца, $[\text{кг}/\text{м}^3]$.

Для проведения эксперимента были подготовлены 4 образца бетона, размером 60×60×200, со стержнем арматуры диаметром 10 мм. Внешний вид образца до испытаний представлен на рис. 1.



Рис.1. Внешний вид железобетонного образца до испытаний

Два образца имели однородную структуру бетона и не содержали дефектов арматуры. Третий образец был изготовлен с повышенной пористостью, по сравнению с другими, а также имел искусственные трещины в бетоне и не имел дефектов арматуры, четвертый образец также имел искусственные трещины в бетоне и дефект арматуры в виде утоньшения диаметра. Искусственные трещины моделировались цилиндрическим отверстием диаметром 2 мм от поверхности образца до арматурного стержня. Исходные данные и значения пористости представлены в таблице 1.

Значение пористости в свою очередь 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.

Таблица 1.

Значения параметров образцов

Номер образц а	Масса насыщенног о образца m, кг	Масса не насыщенного образца m, кг	Объем образца, V, м ³	Плотность насыщенног о образца, ρ , кг/м ³	Плотность не насыщенног о образца, ρ_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
3	1,865	1,721	0,720	2,590	2,390	7,7
4	2,404	2,357	0,987	2,436	2,388	1,9

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 восстановления меди, соответственно. Общая реакция представлена уравнением (4), здесь Fe(OH)₂, является одним из нескольких возможных продуктов коррозии, в зависимости от окружающей среды.

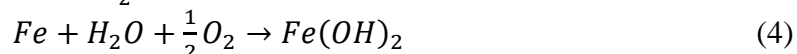
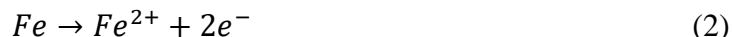


Схема протекания процесса коррозии железобетона представлена на рис. 2. После разрушения пассивного слоя формируется точка, и растворение железа протекает в соответствии с уравнением (3). Электроны переносятся от анода к катоду (электронный ток), где происходит восстановление кислорода, согласно уравнению (4).

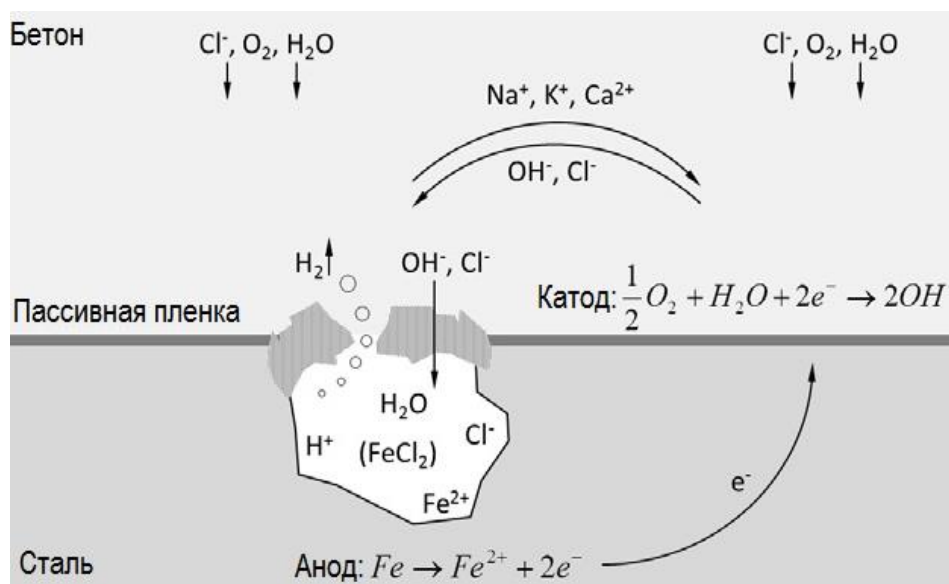


Рис.2. Схематичное изображение процесса коррозии

Изготовленные образцы, с рассчитанной ранее на пористостью, были подвержены электрокоррозии путем помещения в водный раствор электролита с различной концентрацией NaCl и подключением к внешнему источнику напряжения. Электрохимическая коррозия арматуры может усилиться токами утечки или блуждающими токами от электрифицированного рельсового транспорта.

Место стекания электрического тока с арматуры является анодом. На нем происходит окисление железа. В слое бетона, выполняющего роль электролита, насыщенного различными ионами, будет проходить электролиз. Подобный механизм электрокоррозии происходит в грунте под действием блуждающих токов.

Каждый образец был помещен в раствор хлорида натрия, как показано на рис. 3 а, б, в качестве анода выступала стальная арматура, а в качестве катода медная пластина. Которые были подключены к внешнему источнику напряжения.

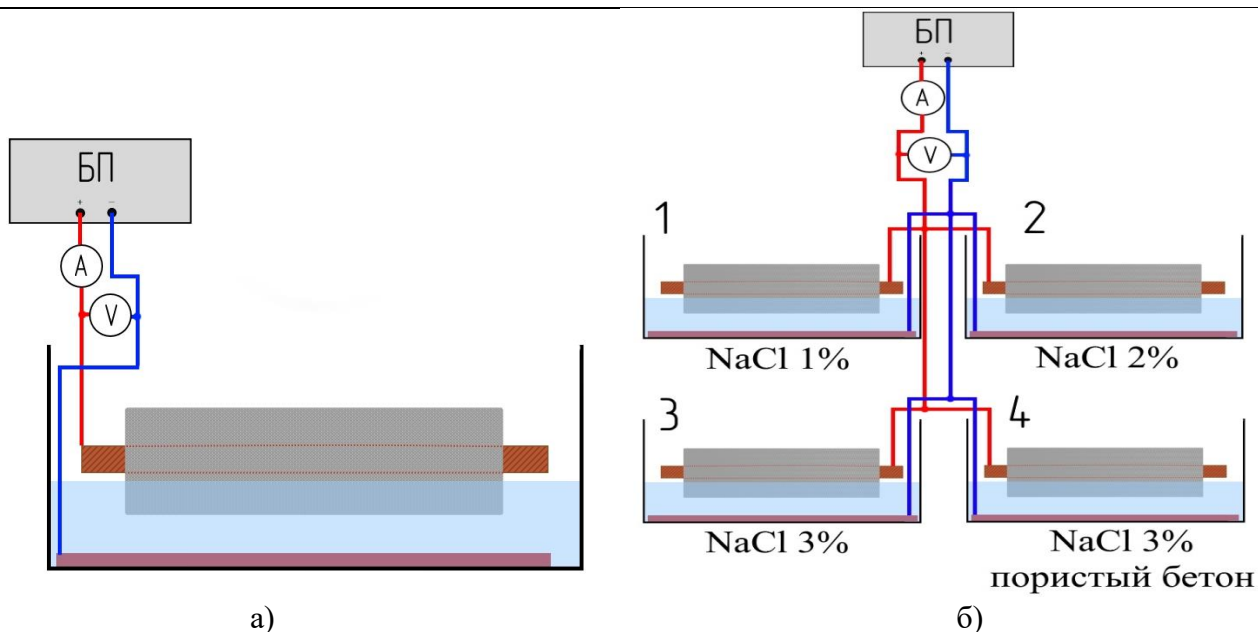


Рис. 3. Схема установки для исследования процесса электрокоррозии
 а) один образец; б) испытание четырех образцов в различных средах.

Образцы 1, 2 и 3 были помещены в одно, двух и трех процентные растворы хлорида натрия, образец 4 был также помещен в трех процентный 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, как показано на рис. 4, были обнаружены бурые пятна, содержащие продукты коррозии, что свидетельствует о разложении стальных стержней арматуры.

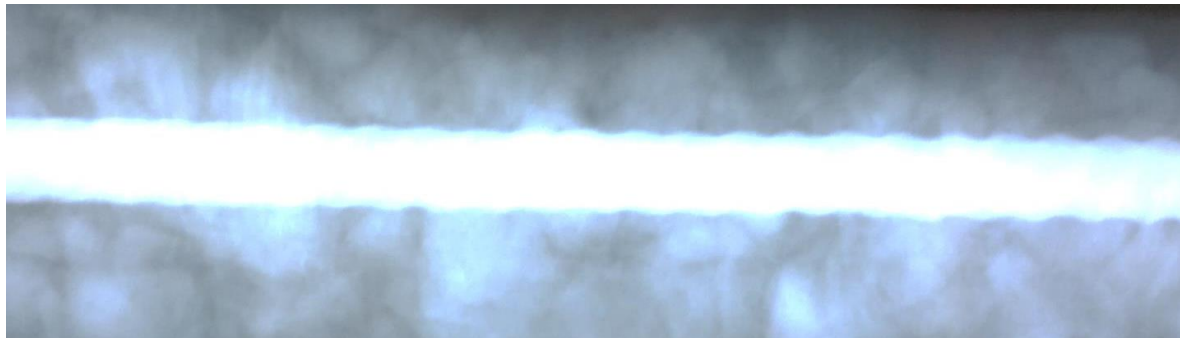
Для анализа изменения диаметра стальных стержней внутри бетона и дальнейшего сопоставления с концентрацией продуктов коррозии на поверхности бетона, был произведен рентгенографический контроль. На рис. 5 а, б показано уменьшение поперечного сечения арматуры.

Сечение арматуры, до того, как она подверглась коррозии и после, было разбито на элементарные области с шагом 1 мм, а площадь рассчитана с помощью интегрирования по контуру изображения заданной яркости. После произведенного расчета площади, было выявлено, что сечение арматуры уменьшилось на 5%. Таким образом, около 5% железа вышло на поверхность железа.

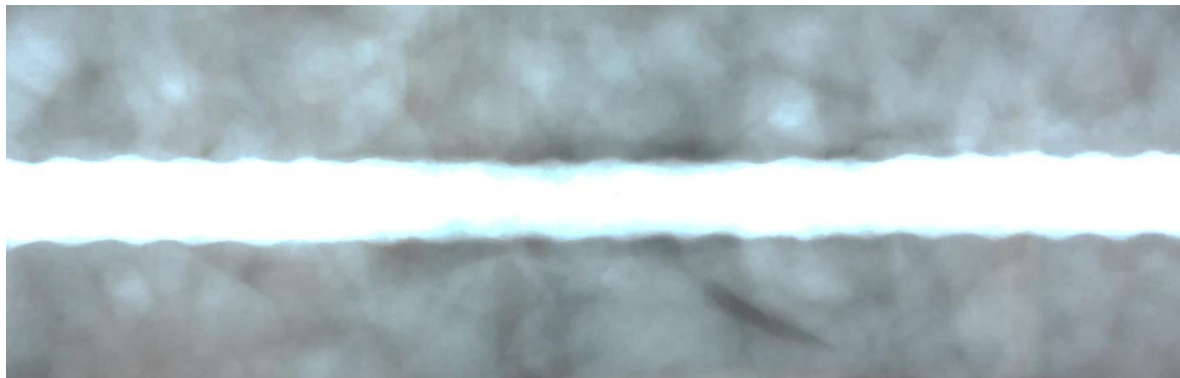


Рис. 4. Образец, подверженный электрокоррозии

Со всех исследуемых образцов и одного не участвующего в электролизе, был снят верхний слой бетона, полученные порошки были помещены в кратеры графитовых электродов и залиты клеем (рис. 6). Кроме того были подготовлены образцы, содержащие только ржавчину, чистый бетон, и чистый электрод с клеем и без него.



а)



б)

Рис.5. Рентгеновские снимки образца №2
а) до воздействия коррозии; б) после воздействия коррозии



Рис. 6. Графитовые образцы для проведения спектрального анализа

Для всех исследуемых электродов был проведен спектральный анализ на эмиссионном спектрометре "АРГОН-5СФ". На рис. 7 приведена схема анализа графитовых стержней.

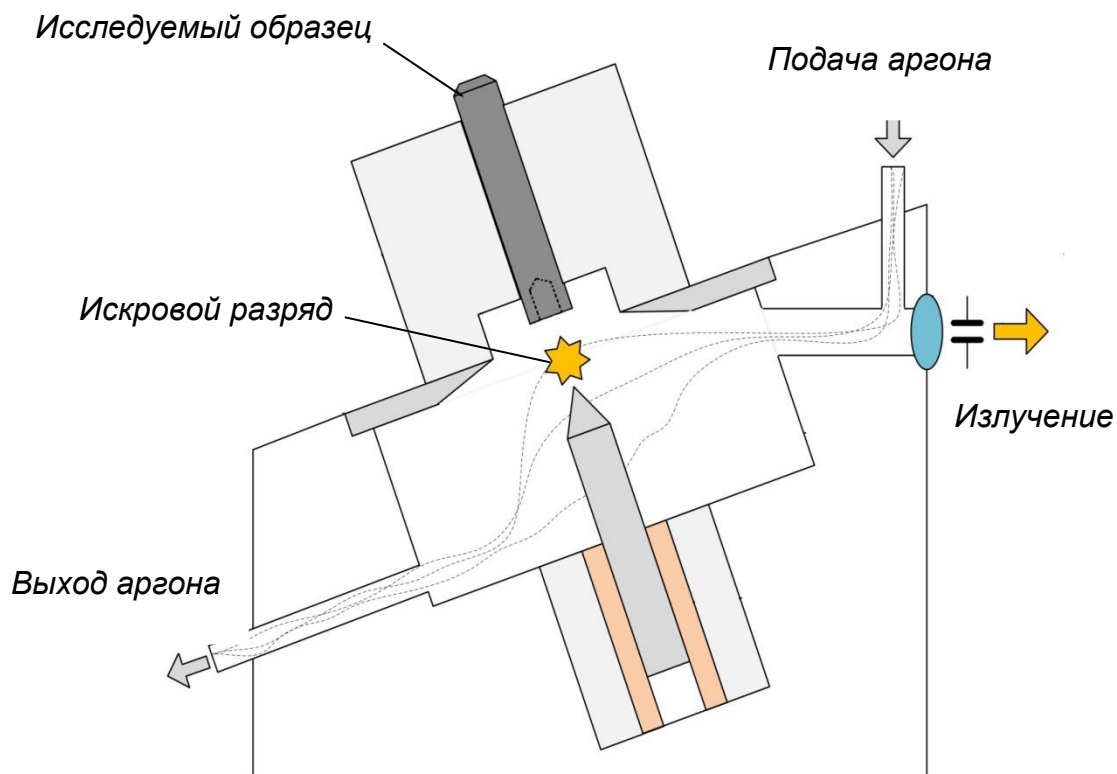


Рис.7. Схема анализа графитовых стержней на спектрометре «Аргон-5СФ»

Численные значения интенсивностей спектральных линий железа (275,574 нм), углерода (193,090 нм), а также относительная интенсивность для исследуемых образцов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Таблица значений интенсивности углерода и линии сравнения

Образец	I_{Fe}	I_C	$I_{отн}$
1%	1118252	4979994	0,225
2%	2964327	3576839	0,829
3%	1172748	759444	1,544
3%п	1460473	598319	2,441
Ржавчина	4244541	3272797	1,297
Бетон	771789	3350958	0,230
Клей	67166	3647528	0,018
Графит	48344	5942766	0,008

Полученные спектры, наложенные друг на друга, при различной степени коррозии, представлены на рис. 8.

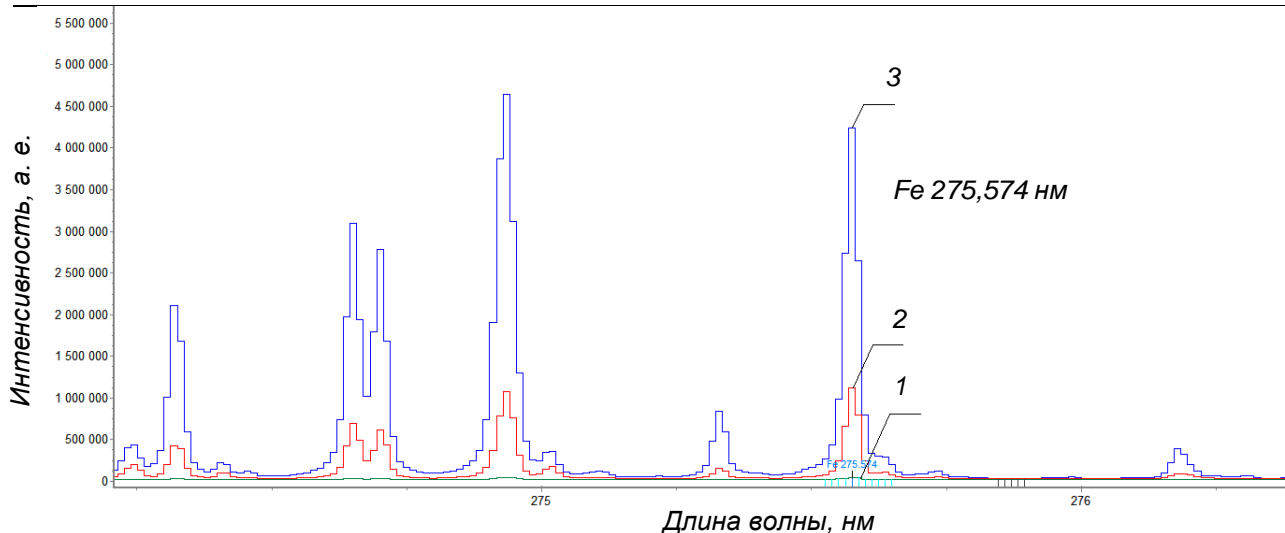


Рис. 8. Спектральные линии трех образцов, с различной степенью коррозии: 1 - чистый графит; 2 - среднее содержание коррозии в бетоне; 3 - ржавчина

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. Проведено рентгенографическое исследование металлической арматуры внутри бетона после различного воздействия факторов, влияющих на скорость ее коррозии.

3. 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».

4. В дальнейших исследованиях предлагается оценить характеристику прочности железобетонных опор контактной сети с результатами инструментальных измерений количества элементов на поверхности, сопровождающих коррозию.

Литература

1. Millar S., Wilsch G., Eichler T., Gottlieb C., Wiggenger H. Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen – automatisierte Baustoffanalyse // Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), Heft 8. P. 501–510.

2. Алексеев С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне. НИИЖБ Госстроя СССР/Стройиздат, 1968. – 233 с.

3. ГОСТ 12730.4-78. Бетоны. Методы определения показателей пористости.

4. Иванов. А. С. Рентгенография металлов. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 77 с.

5. Гончуков С. А. Рамановская спектроскопия каротиноидов [Текст]: учебное пособие/ С. А. Гончуков, М. Е. Дарвин, Ю. Ладеманн; М-во образования и науки Российской Федерации, Нац. исслед. ядерный ун-т "МИФИ". – Москва: НИЯУ МИФИ, 2012. – 36 с.

6. Кремерс Д. А., Радziemски Л. И. Лазерно-искровая эмиссионная спектрометрия, пер. с англ. под ред. Н. Б. Зорова, М.: Техносфера, 2009. 360 с.

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. Ч.4. № 12. 2015. С. 610 - 615.

Известия КГТУ им. И.Раззакова 50/2019

8. Лабутин Т. А., Попов А. М., Райков С. Н., Зайцев С. М., Лабутина Н. А., Зоров Н. Б. Определение хлора в бетонах на воздухе методом лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии // Журнал прикладной спектроскопии Т.80, № 3. 2013. С. 325–329.

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

10. Родников С. Н., Лихачев В. А., Шишкина С. В., Кондратов В. М., Вопросы металловедения в гальванотехнике и коррозии: Учебное пособие. - Горький: изд. ГГУ, 1989. – 104 с.

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