

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПОЛЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОРРОЗИИ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по определению продуктов коррозии на поверхности железобетонных конструкций. Обсуждаются способы создания образцов с искусственной электрокоррозией в условиях, приближенных к реальной эксплуатации. Приведены результаты испытаний образцов с различной степенью коррозии с использованием приборов лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС). Испытание выполнено на двух различных приборах, установке ЛИЭС и портативном лазерном анализаторе американского производства LIBZ-300ре.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, дефекты коррозии, поверхность, лазерная спектрометрия, бетонный образец, лазерный анализатор, чувствительность прибора.

Введение. Диагностирование коррозионного состояния полых железобетонных конструкций, к которым относятся опоры контактной сети железных дорог постоянного тока, является актуальной задачей. В эксплуатации находится более 1 миллиона опор, многие из которых могут находиться в аварийном состоянии. Большое значение имеют методы диагностирования, выявляющие дефекты, в первую очередь — потерю прочности, обусловленные коррозией арматурных стержней и бетонного камня [1].

Известен ряд методов неразрушающего контроля, основанных на ультразвуковом, электрохимическом и визуальном контроле. Их достоинства и недостатки описаны в работе [2]. В предлагаемой статье обсуждается возможность использования приборов лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии (ЛИЭС) для обнаружения продуктов коррозии на поверхности железобетонных конструкций. Также обсуждаются вопросы создания лабораторных образцов с различной степенью коррозии, аналогичной для реальных конструкций.

Лабораторные образцы, исследуемые в работе, представляют собой бетонные блоки размером 200×60×60 мм с металлической арматурой в центре диаметром 10 мм и длиной также 200 мм. Арматура выходит от верхней поверхности бетонного образца на 30 мм [3].

Для проведения эксперимента были подготовлены образцы без отверстий, а также образцы,

в которых были выполнены отверстия диаметром 2 мм перпендикулярно от поверхности до арматуры, моделирующие трещины в бетоне:

- без отверстий (обозначение — БО);
- одно отверстие (обозначение — О1);
- два отверстия (обозначение — О2);
- четыре отверстия (обозначение — О4, см.

рис. 1).

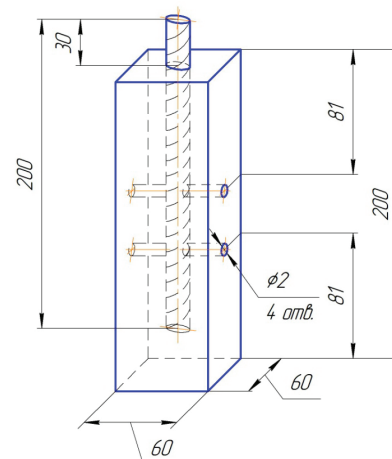


Рис. 1. Схематичное изображение лабораторного образца с четырьмя отверстиями (О4)

Химический состав арматурной стали марки 25Г2С

C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	Ni, %	S, %	P, %	Cu, %
0,20–0,29	1,20–1,60	0,60–0,90	≤0,30	≤0,30	≤0,045	≤0,04	≤0,30

Таблица 2

Сводная таблица данных по эксперименту

№ ванны	Обозначение образцов	Кол-во образцов	Напряжение источника, В	Среднее значение тока, А	Время включения тока, час
1	O2	2	5	0,40	102
	O4	2			
2	O1	2		0,45	102
	O2	2			
3	БО	4		0,30	78

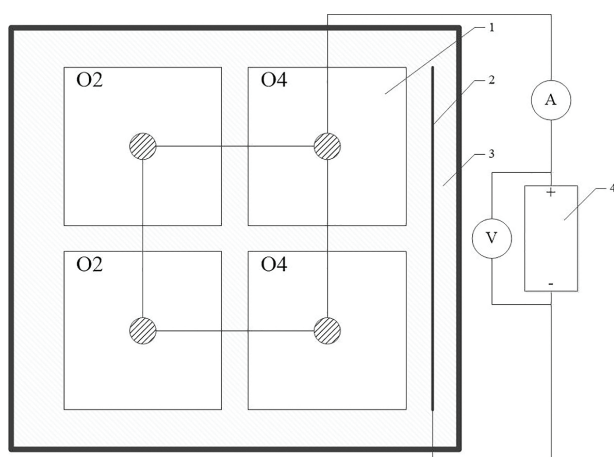


Рис. 2. Схема проведения электролиза (ванна 1):
1 — лабораторный образец; 2 — медная пластина;
3 — раствор NaCl;
4 — регулируемый источник питания постоянного тока



Рис. 3. Лабораторные образцы из ванны 1 после пропускания тока в течение 102 часов

Технология изготовления соответствует технологии изготовления реальных железобетонных опор контактной сети. Цемент соответствует марке М350, а класс бетона по прочности — В30. Бетон состоит из цемента, песка, щебня (керамзит) и воды. Щебень и песок являются заполнителями бетонной смеси, а цемент — связующим веществом. Раствор замешан в отношении 1/1,9/3,7/0,5 (цемент/песок/щебень/вода). Стальная арматура соответствует классу А-III по ГОСТ 5781. Марка стальной арматуры 25Г2С, химический состав которой представлен в таблице (табл. 1).

Образцы подключались к внешнему источнику напряжения, что соответствует реальным условиям эксплуатации опор контактной сети. В трех ваннах, заполненных 3 % раствором NaCl, находилось по четыре образца, арматура которых соединялась электрическим проводником [4]. Время воздействия

электрического тока и параметры источника питания приведены в табл. 2.

Подключение внешнего источника питания позволяет имитировать воздействие токов утечки и блуждающих токов от электрифицированного рельсового транспорта. Место стекания электрического тока с арматуры является анодом — на нем происходит окисление железа. Слой бетона будет выступать в качестве электролита, насыщенного различными ионами, где будет проходить процесс электролиза. В качестве катода выступает медная пластина. Расположение образцов в электролитической ванне представлено на рис. 2, а внешний вид образцов после испытаний — на рис. 3.

На фотографиях образцов можно наглядно увидеть, что основное окисление арматуры происходит на границе раздела воздух — электролит, обусловленное свободным поступлением кислорода. Второе

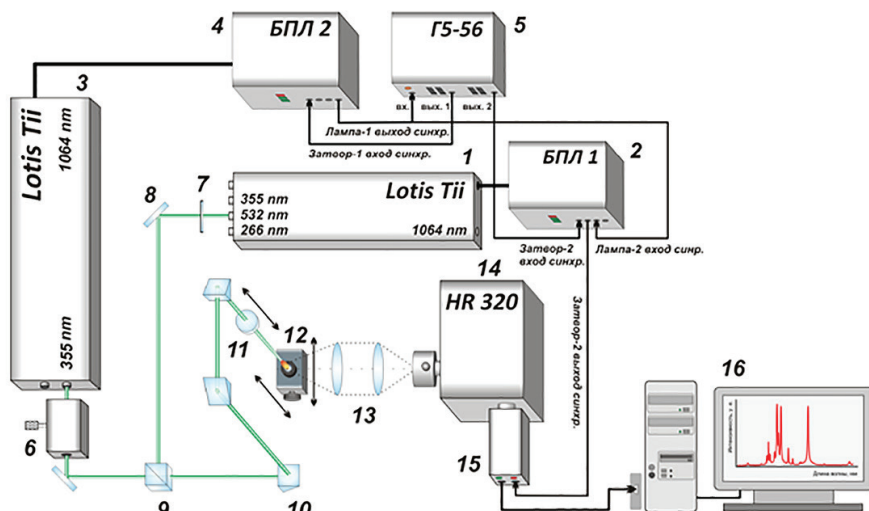


Рис. 4. Схема экспериментальной установки ЛИЭС

- 1, 3 — лазер; 2, 4 — блок питания лазера; 5 — двухканальный генератор импульсов;
6 — аттенуатор; 7 — полуволновая пластинка; 8 — зеркало;
9 — поляризационный куб; 10 — призма; 11 — ахроматический объектив;
12 — двухкоординатный столик; 13 — кварцевый двухлинзовый конденсор;
14 — спектрограф; 15 — стробируемая электронно-оптическая камера;
16 — персональный компьютер

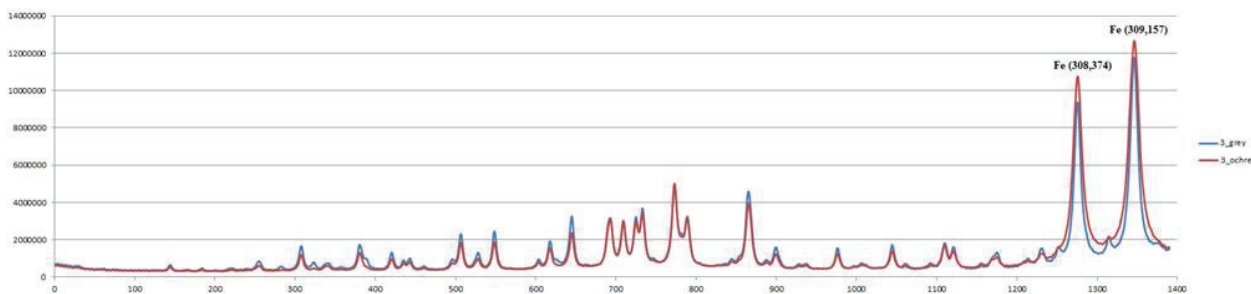


Рис. 5. Спектры образцов с различной степенью коррозии (290–310 нм)

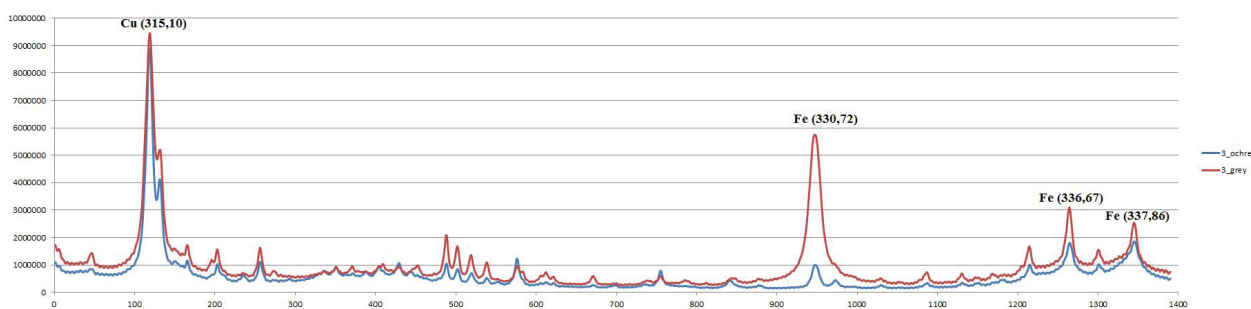


Рис. 6. Спектры образцов с различной степенью коррозии (316–336 нм)

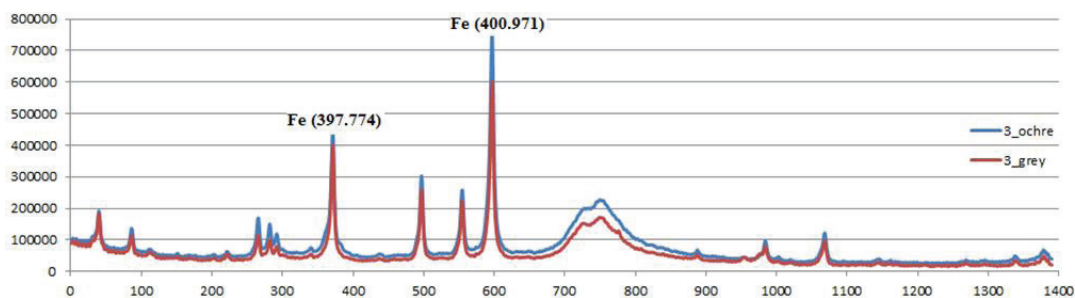


Рис. 7. Спектры образцов с различной степенью коррозии (392–412 нм)



Рис. 8. Портативный лазерный анализатор LIBZ-300

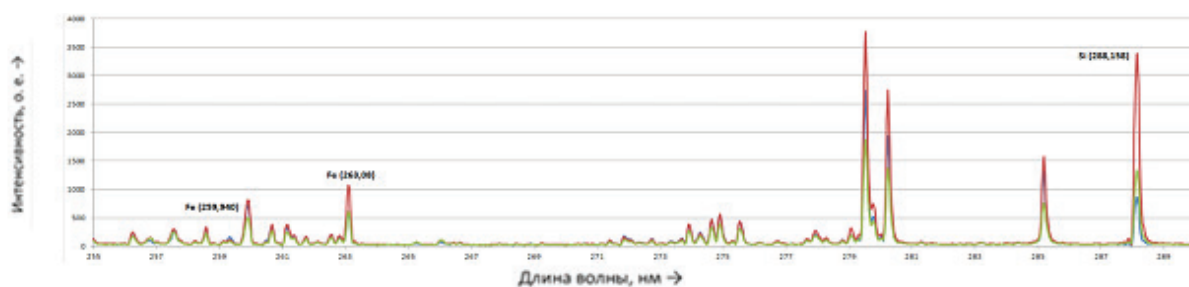


Рис. 9. Спектры трех образцов с различным содержанием продуктов коррозии в диапазоне 255–289 нм

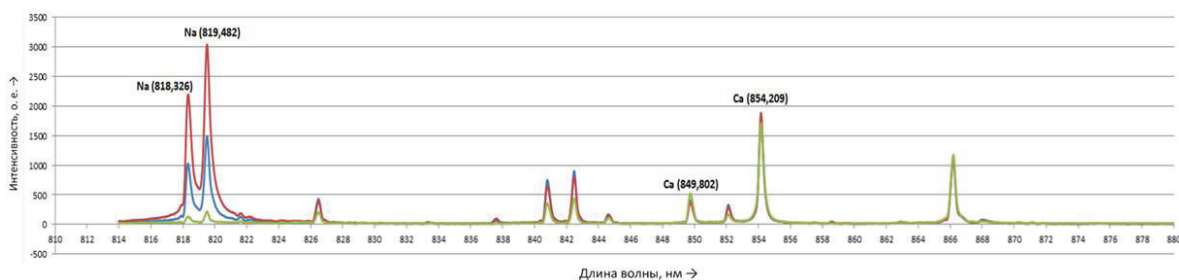


Рис. 10. Спектры трех образцов с различным содержанием продуктов коррозии в диапазоне 810–880 нм

место по количеству продуктов коррозии — поверхность вблизи отверстий. Наличие отверстий ускоряет процесс коррозии благодаря снижению переходного сопротивления между анодом и катодом во внешней цепи. Движение продуктов коррозии осуществляется от анода к катоду, что способствует увеличению их концентрации на поверхности железобетонной конструкции.

Для количественного определения изменения сечения арматурных стержней по сравнению с исходным состоянием был изготовлен аналогичный образец, не подвергавшийся воздействию агрессивной среды и электрического тока. Уменьшение сечения арматуры без разрушения образцов можно проверить рентгенографическим методом, как это описано в работе [3, 4]. Измерение концентрации продуктов коррозии на поверхности образцов выполняли спектральными методами ЛИЭС [5–7], достоинством которых является возможность анализа как металлических, так и неметаллических проб.

Измерения с временной селекцией проведены на экспериментальной установке ЛИЭС, описанной в [8, 9]. Излучение второй гармоники АИГ: Nd-лазера с ламповой накачкой LOTIS LS-2134UTF (532

нм, энергия импульса 80 ± 1 мДж, длительность 6 нс, частота 5 Гц) фокусировали на поверхность образца с помощью ахроматического дублета с $f = 150$ мм. Излучение плазмы зарегистрировано с помощью спектрографа, оснащенного стробируемым высокоскоростным детектором «Наноскан-2В» [10, 11].

Спектральный анализ проводился на экспериментальной установке лазерно-искрового эмиссионного спектрометра (рис. 4).

Результаты экспериментов. Спектры, полученные на экспериментальной установке ЛИЭС, представлены на рис. 5–7.

Образец БО (табл. 1) имел минимальное количество следов коррозии на поверхности бетона, а образец О4 — максимальное. Для сравнения образец ОО не подвергался электрокоррозии (чистый бетон). Подаваемое напряжение 5В, ток различался, так как увеличение концентрации NaCl усиливает протекание электрокоррозии. После искусственного старения проведен рентгенографический контроль толщины стальной арматуры образцов О4 и О2. Полученные изображения арматуры позволили установить, что толщина арматуры при электролизе уменьшилась на 7,5 % (ярко выраженные шей-

ки со стороны отверстий), т. е. эта часть стальной арматуры проникает в цементный камень и за счет соединений железа окрашивает его.

На рис. 5 изображены спектры двух образцов О2 (grey) (бетон с малым содержанием следов коррозии) и О4 (ochre) (бетон с большим содержанием коррозии) в диапазоне 290–310 нм. На длинах волн 308,374 нм и 309,157 нм зарегистрированы спектральные линии железа. По полученным значениям интенсивности можно сделать вывод о том, что образец с большим содержанием продуктов коррозии имеет наибольшее значение интенсивности спектральных линий железа.

На рис. 6 представлены значения интенсивностей тех же образцов в диапазоне 316–336 нм. Образец О4 (ochre) имеет большие пики на линиях железа (330,78 нм, 336,67 нм, 337,86 нм) по сравнению с образцом О2 (grey).

Таким образом, по результатам обработки полученных спектров можно сделать вывод, что у образца с наибольшим содержанием коррозии на поверхности бетона О4 (ochre) больше интенсивность спектральной линии железа на различных диапазонах длин волн. Можно сделать вывод о том, что прибор ЛИЭС чувствителен к определению продуктов коррозии на поверхности бетона.

Аналогичную картину можно наблюдать на рис. 7 на диапазоне 392–412 нм.

В качестве нестролируемой ЛИЭС-системы использован портативный комплекс LIBZ-300 (SciAps, США). Образцы размещались на однокоординатном столике, лазерное излучение фокусировалось на 3 мм ниже поверхности для улучшения воспроизводимости измерений (диаметр кратера ~0,2 мм). Внешний вид прибора представлен на рис. 8.

При помощи прибора LIBZ-300 были проанализированы те же три образца с различным содержанием продуктов коррозии (аналогично, как и для установки ЛИЭС, образцы О4 (ochre) и О2 (grey), а также ОО — чистый бетон. Спектры, полученные на LIBZ-300, представлены на рис. 9, 10.

Таким образом, по результатам измерений и анализа образцов с различной степенью коррозии, выполненных на двух приборах спектрального анализа, можно подтвердить возможность и эффективность использования спектрального анализа в задачах диагностирования и определения коррозионного состояния железобетонных конструкций.

Заключение. На основании рентгеновского исследования образцов бетона установлено значимое растворение арматуры при старении железобетонных изделий в электролитической ванне. Сравнение стролируемого и нестролируемого детекторов в методе лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для определения продуктов коррозии на поверхности бетона показывает значительные различия в сигналах железа, хрома и марганца на всех участках поверхности только при выборе подходящего времени наблюдения спектров. В случае нестролируемого детектора различия проявляются только при попадании на окрашенные участки поверхности, т. е. в местах наибольшего накопления продуктов коррозии. Это, по-видимому, связано с влиянием матричных эффектов на время свечения лазерной плазмы.

Продемонстрирована перспективность лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии для определения продуктов коррозии на поверхности железобетонных изделий при использовании стролируемого детектора.

Библиографический список

1. Брюхова А. С., Кузнецов А. А. 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.
2. Кузнецов А. А., Брюхова А. С., Фомиченко К. И. Исследование процесса коррозии на поверхности железобетонных изделий // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте: материалы III Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 18–19 окт. 2018 г. / ОмГУПС. Омск, 2018. С. 14–21. ISBN 978-5-94941-213-8.
3. Кремерс Д., Радзиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / пер. с англ. А. А. Горбатенко; под общ. ред. Н. Б. Зорова. М.: Техносфера, 2009. 358 с. ISBN 978-5-94836-235-9.
4. Zaytsev S. M., Popov A. M., Zorov N. B., Labutin T. A. Measurement system for high-sensitivity LIBS analysis using ICCD camera in LabVIEW environment // Journal of Instrumentation. 2014. Vol. 9. P. 06010. DOI: 10.1088/1748-0221/9/06/P06010.
5. Коновалова В. С., Румянцев В. Е. Влияние хлоридов на защитные способности бетона в железобетонных конструкциях // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2015. № 1. С. 308–312.
6. 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.
7. Wilsch G., Weritz F., Schaurich D. [et al.] Determination of chloride content in concrete structures with laser-induced breakdown spectroscopy // Construction and Building Materials. 2005. Vol. 19 (10). P. 724–730. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.001.
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. 325–330.
9. Kuznetsov A. A., Zaprudskiy A. A., Bryukhova A. S., Fomichenko K. I. Corrosion diagnostics technology improvement of reinforced concrete supports of the railways catenary system // Metrology and Metrology Assurance 2018: Proc. of the 25th Scientific Symposium with Intern. Participation, Sept. 7–11, 2018. Sozopol, Bulgaria, 2018. P. 169–174.
10. Labutin T. A., Zaytsev S. M., Popov A. M. [et al.]. Comparison of the thermodynamic and correlation criteria for internal standard selection in laser-induced breakdown spectrometry // Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy. 2013. Vol. 87. P. 57–64. DOI: 10.1016/j.sab.2013.05.021.
11. Labutin T. A., Zaytsev S. M., Popov A. M. Automatic identification of emission lines in laser-induced plasma by correlation of model and experimental spectra // Analytical Chemistry. 2013. Vol. 85, Issue 4. P. 1985–1990. DOI: 10.1021/ac303270q.

БРЮХОВА Анна Сергеевна, инженер кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 4704-7607

AuthorID (РИНЦ): 1009377

Адрес для переписки: annaivan29@gmail.com

ВОЛКОВА Наталия Владимировна, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника».

SPIN-код: 3882-5087

AuthorID (РИНЦ): 1044951

Адрес для переписки: wolf.volkova@yandex.ru

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

SPIN-код: 3897-7011

AuthorID (РИНЦ): 1013551

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: kuznetsova.a.omgups@gmail.com

Для цитирования

Брюхова А. С., Волкова Н. В., Кузьменко А. Ю., Кузнецов А. А. Определение химического состава на внутренних поверхностях полых железобетонных конструкций при воздействии коррозии // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 123–128. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-173-123-128.

Статья поступила в редакцию 22.09.2020 г.

© А. С. Брюхова, Н. В. Волкова, А. Ю. Кузьменко,
А. А. Кузнецов