

Оригинальная статья / Original article

УДК 620.193.4

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-205-212>

Исследование противокоррозионных свойств эпоксидных композиций методом импедансной спектроскопии

© И.В. Польшинский*, В.В. Мироненко*, М.М. Польшинская**, Е.А. Анциферов*

*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская федерация

**Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск, Российская федерация

Резюме: Металлы и их сплавы являются важными конструкционными материалами. Воздействие окружающей среды на металлические изделия и конструкции приводит к самопроизвольному разрушению, которое происходит в результате их электрохимического или химического взаимодействия с окружающей средой. Для защиты металлических изделий от коррозии используют эпоксидные смолы и композиционные материалы. Поглощение воды и диффузия в эпоксидных покрытиях может вызвать электрохимические реакции на границе раздела полимер–металл, которые являются основной причиной разрушения металлов с полимерным покрытием в условиях эксплуатации. Цель настоящей работы – исследовать антикоррозионное поведение эпоксидных композиций после сернокислотного воздействия. Методом импедансной спектроскопии исследованы эпоксидные покрытия на стальной основе. В состав эпоксидного связующего входили смолы на основе бисфенола А, отвержденные различными аминными отвердителями. Для выявления структурных изменений материалов и изменения их защитных свойств проводилось моделирование воздействия агрессивной среды: 30-дневная выдержка в концентрированной серной кислоте. Получены годографы импеданса исследованных систем, предложены эквивалентные схемы для аппроксимации экспериментальных данных. Высокая пористость эпоксидной системы на основе NPEK-114L приводит к увеличению скорости коррозии. Растворение продуктов коррозии при более длительном времени испытаний и, как следствие, более высокая диффузия коррозионных ионов в покрытие вызывают снижение коррозионной стойкости. Эпоксидные композиции на основе смолы NPEL-128 (олигомерный продукт на основе диглицидилового эфира дифенилолпропана) показали улучшенные антикоррозионные характеристики. Установлено, что добавка алкил-глицидилового эфира для уменьшения вязкости смолы NPEK-114L ухудшает защитные свойства композита при воздействии кислоты.

Ключевые слова: эпоксидные композиции, бисфенол А, импедансная спектроскопия, стойкость при воздействии кислот

Информация о статье: Дата поступления 10 октября 2019 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

Для цитирования: Польшинский И.В., Мироненко В.В., Польшинская М.М., Анциферов Е.А. Исследование противокоррозионных свойств эпоксидных композиций методом импедансной спектроскопии. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10. N 2. С. 205–212. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-205-212>

Impedance spectroscopy study of anticorrosive properties of epoxy compositions

Igor V. Polynskii*, Vladimir. Mironenko*, Mariia M. Polynskaya**, Evgeniy A. Antsiferov*

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: Although metals and their alloys are important structural materials, electrochemical or chemical interactions between metal structures and the environment leads to their spontaneous destruction. In order to protect metal products from corrosion, epoxy resins and polymer composite materials can be applied. However, polymer-coated metals may degrade under operating conditions due to electrochemical reactions at the polymer-metal interface caused by water absorption and diffusion in epoxy coatings. The present study is aimed at an investigation of the anticorrosive behaviour characteristic of epoxy compositions following exposure to sulphuric acid. The method of impedance spectroscopy was applied to evaluate epoxy coatings on a steel base. The composition of the epoxy binder included bisphenol A resins cured with various amine curing agents. In order to identify structural changes in materials, as well as the changes in their protective properties, the effects of an aggressive environment were simulated by means of exposure to concentrated sulphuric acid over a 30-day period. Impedance hodographs of the studied systems were obtained and equivalent schemes for the approximation of experimental data proposed. The high porosity of the NPEK-114L based epoxy system was established to result in an increase in the corrosion rate. Dissolution of corrosion products over a longer test period – and consequent higher diffusion of corrosive ions in the coating – was determined to cause a decrease in corrosion resistance. Epoxy compositions based on NPEL-128 resin (oligomeric product based on diphenylolpropane diglycidyl ether) demonstrated improved anticorrosion characteristics. The addition of alkyl glycidyl ether for NPEK-114L resin viscosity reduction was shown to affect the protective properties of the composite under acid exposure.

Keywords: epoxy compositions, bisphenol A, impedance spectroscopy, acid resistance

Information about the article: Received October 10, 2019; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

For citation: Polyansky IV, Mironenko VV, Polynskaya MM, Antsiferov EA. Impedance spectroscopy study of anticorrosive properties of epoxy compositions. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(2):205–212. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-2-205-212>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие новых производств в химической, нефтехимической, электронной и машиностроительной отраслях промышленности, а также в атомной энергетике привело к необходимости создания покрытий, обладающих высокой химстойкостью, прочностью, технологичностью при нанесении на металлическую подложку и долговечностью в эксплуатации.

Для оценки свойств разрабатываемых покрытий с успехом используются экспериментальные методы импедансной спектроскопии, позволяющие оценивать антикоррозионную эффективность покрытий как в лабораториях, так и в производственных условиях [1–5].

Целью данной работы являлось исследование противокоррозионной эффективности ряда композитных эпоксидных покрытий при помощи методов импедансной спектроскопии. Для выявления структурных изменений материалов и изменения их защитных свойств проводилось моделирование воздействия агрессивной среды: 30-дневная выдержка в концентрированной серной кислоте (начальные 24 ч – при 80 °С, дальнейшая выдержка – при комнатной температуре).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Измерения проводили на приборе PGSTAT 302N (Metrohm Autolab) в диапазоне 5–0,01 Гц в 3-электродной электрохимической ячейке. Рабочий электрод представлял собой

металлическую пластину площадью 2 см², покрытую эпоксидными составами, выдержанную в серной кислоте. Вспомогательным электродом служила платиновая пластина, а в качестве электрода сравнения использовали хлоридсеребряный электрод. Все измерения проводились при постоянном поддержании температуры в ячейке 25 °С в 0,1 нормальном растворе серной кислоты.

Объектами исследования выступали эпоксидные композиции, где состав наполнителя был постоянным (кварцевая мука со средним размером частиц 30 мкм – 30 %, диоксид титана марки R-996 0,23 мкм – 5 %, колер – 1 %), а состав смолы и тип отвердителя менялись (табл. 1). В качестве эпоксидных смол использовались стандартные коммерческие продукты производства компании Nan Ya Plastics, Тайвань. Искользованные для приготовления образцов эпоксидные смолы представляют собой стандартный тип смолы на основе бисфенола А для адгезивов, покрытий и герметиков (аналог ЭД-20/22). Для этих смол масса эпоксидного эквивалента находится в диапазоне 180–200 г/экв, а основное различие обусловлено вязкостью, которая контролируется разбавителями.

Приготовление составов композитов производилось с учетом стехиометрических соотношений смола/отвердитель. Составы смол приготавливались из смол NPEK-114L и NPEL-128 в соотношении 50:50 %. В качестве

Таблица 1

Состав эпоксидного связующего исследованных образцов

Table 1

Epoch binder composition of the studied samples

Образец	Смола	Вязкость*, (мПа·с при 25°C)	Масса эпоксидного эквивалента*, г/экв	Отвердитель
1	NPEK-114L	600–1200	195–204	ХТ
2	NPEL-128	12000–15000	181–185	М-4
3	NPEK-114L + NPEL-128	6300–8100	188–195	ХТ
4	NPEL-127	7000–10000	176–185	Поксипол
5	NPEL-128	12000–15000	181–185	Поксипол
6	NPEK-114L + NPEL-128	6300–8100	188–195	М-4

* – данные спецификации производителя.

отвердителя использовались составы на основе модифицированных алифатических аминов (ХТ-489, М-4) и отвердитель на основе триметиламина («Поксипол»). Полимеризация приготовленных составов проводилась при начальной выдержке при температуре 70 °С один час с последующей сушкой при температуре 25 °С сутки.

Толщина всех образцов была изначально одинаковой и составляла 450 мкм. Перед началом измерения все образцы замачивались в 0,1 нормальном растворе серной кислоты на сутки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее широко используемым в настоящее время методом исследования коррозионной стойкости окрашенных металлов является емкостно-омический или импедансный, на основе которого исследовались системы с различными покрытиями [6–9]. Суть метода заключается в измерении электрических емкости и сопротивления окрашенного металла, погруженного в электролит, при наложении на систему переменного тока. Метод основан на представлении, что металл с покрытием при контакте с электролитом описывается эквивалентной электрической схемой, в которой емкость и сопротивление соединены параллельно. Таким образом, в момент соприкосновения с электролитом система может рассматриваться как конденсатор с потерями, в котором металл и электролит являются обкладками, а диэлектрической прокладкой выступает лакокрасочное покрытие. Признаком наличия или появления дефекта в покрытии является изменение сопротивления и емкости исследуемой системы¹ [2, 10]. По мере нарушения сплошности покрытия и появления участков с прямой проводимостью электролит достигает поверх-

ности металла, и измеряемая емкость будет определяться суммой электрической и электрохимической составляющих. Электрическая емкость мала по величине и не зависит от частоты, а электрохимическая емкость сильно зависит от частоты и возрастает по мере разрушения покрытия. Сопротивление зависит от частоты переменного тока в том случае, когда покрытие обладает высокими изолирующими свойствами, что характерно для начального момента воздействия электролита на лакокрасочное покрытие и для покрытий с высокими защитными свойствами. Для покрытий с низкими защитными свойствами характерно отсутствие или слабая зависимость сопротивления от частоты.

В данном случае систему «металл – покрытие – электролит» следует рассматривать как электрохимически активную, имеющую специфические свойства, связанные с наличием на поверхности металла пленки эпоксидного покрытия, изменяющего характер диффузии реагирующих веществ и кинетику электрохимических реакций [11, 12].

Традиционно для покрытий, содержащих наполнитель, используют такую эквивалентную схему для описания электрохимического поведения, где первое звено отвечает за электрическое поведение наполнителя и границу раздела двух диэлектриков, а второе звено описывает свойства полимерного связующего (рис. 1, а) [13]. Эквивалентная схема была подобрана экспериментальным путем с помощью программного обеспечения Nova 1.8 (рис. 1, б).

Элемент постоянной фазы (Constant phase element – CPE) является обобщенным и универсальным средством для моделирования импеданса обширного класса электрохимических систем [14, 15]. Этот элемент может отражать как экспоненциальное распределение

¹Дамаскин Б.Б., Петрий О.А., Цирлина Г.А. Электрохимия: учебник. М.: Химия, 2006. 672 с.

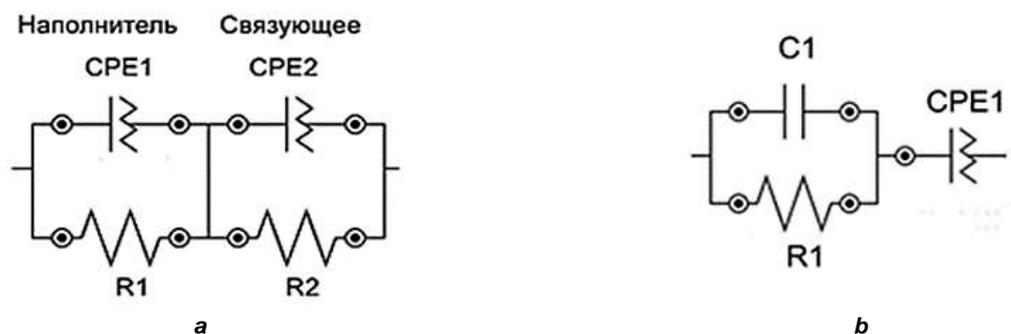


Рис. 1. Эквивалентная схема для описания годографов импеданса покрытий: а – образцы 2, 4, 5; б – образец 6; CPE – элемент постоянной фазы

Fig. 1. Equivalent scheme for describing the impedance hodographs of coatings: а – samples 2, 4, 5; б – sample 6; CPE – constant phase element

параметров данной электрохимической реакции, связанной с преодолением энергетического барьера при переносе заряда и массы, так и импедансное поведение, вызванное фрактальной структурой поверхности исследуемого электрода. В самом общем смысле поведение элемента CPE можно рассматривать как проявление свойств фрактальности в пространстве частот.

Импеданс элемента CPE может быть представлен формулой:

$$Z_{CPE} = 1/Y_o(j\omega)^n,$$

где j – мнимая единица; ω – угловая частота ($\omega = 2\pi f$); Y_o – фактор пропорциональности; n – экспоненциальный показатель, обозначающий фазовое отклонение [15].

Полученные нами экспериментальные годографы импеданса для образцов 1–6 существенно отличаются друг от друга. Для образцов 1 и 3 они не имеют выраженной формы и лежат в пределах 30–1700 Ом. Для образцов 2, 4 и 5 годографы представляют собой правильные полуокружности с центром, расположенным ниже оси координат (рис. 2, а), что ха-

рактерно для систем, описываемых предполагаемой эквивалентной схемой (см. рис. 1, а). Для образца 6 вид годографа отличается от остальных, хотя и характеризуется высоким значением модуля импеданса (рис. 2, б).

Проведение расчета параметров эквивалентных схем при помощи программного обеспечения Nova 1.8 позволило получить оптимальное согласие с ходом годографов для образцов 2, 4, 5, 6 и численные значения для элементов эквивалентных схем (табл. 2). Расчетные годографы хорошо аппроксимируют экспериментальные спектры импеданса, что свидетельствует о наличии в образцах кластеров, статистически различающихся по электросопротивлению и взаимной емкости [16, 17].

Учитывая тот факт, что содержание наполнителя во всех исследованных образцах одинаково, полученные данные для образцов 2, 4, 5 можно интерпретировать следующим образом. При введении в полимерное покрытие кварцевой муки проникновение электролита происходит дополнительно по границам частиц наполнителя с полимерной матрицей. Соответственно, в таком покрытии природа

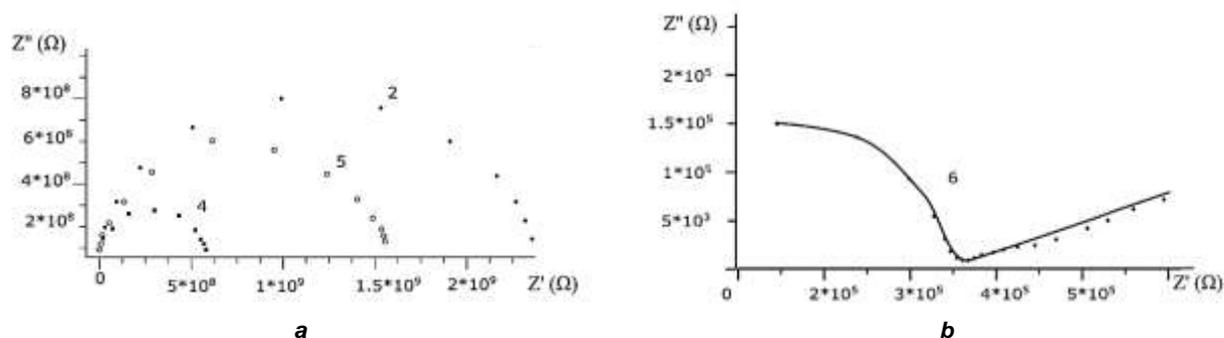


Рис. 2. Годографы импедансов для образцов покрытий 2, 4, 5 (а) и для образца 6 (б); точки соответствуют эксперименту, сплошная линия – расчетным данным

Fig. 2. Impedance hodographs for coating samples 2, 4, 5 (a) and for sample 6 (b); the points correspond to the experiment, solid line – calculated data

Таблица 2

Значения параметров элементов эквивалентных схем
 для годографов импеданса исследованных образцов 2, 4–6

Table 2

Parameter values for equivalent circuit elements
 for impedance hodographs of the studied samples 2, 4–6

Образец	Y_1 $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{n_1}$	n_1	R_1 $\text{Ом} \cdot \text{см}^2$	Y_2 $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{n_2}$	n_2	R_2 $\text{Ом} \cdot \text{см}^2$
2	$1,5 \cdot 10^{-10}$	0,94	$5,24 \cdot 10^9$	$3,9 \cdot 10^{-10}$	0,99	$1,52 \cdot 10^8$
4	$1,43 \cdot 10^{-10}$	0,93	$1,05 \cdot 10^{10}$	$5,1 \cdot 10^{-10}$	0,99	$7,44 \cdot 10^7$
5	$1,46 \cdot 10^{-10}$	0,93	$5,73 \cdot 10^9$	$3,37 \cdot 10^{-10}$	0,98	$1,33 \cdot 10^8$
6	$5,56 \cdot 10^{-6}$	0,16	$2,89 \cdot 10^5$	$1,33 \cdot 10^{-10}$ (C_1)	–	–

каналов-проводников и их кластеризация изменяются и становятся зависимыми от концентрации наполнителя и его распределения в объеме [18, 19]. В случае постоянной концентрации наполнителя вклад первого звена эквивалентной схемы будет одинаковым, что и наблюдается для параметров Y_1 , n_1 , R_1 . Для второго звена схемы, относящегося к собственно эпоксидной матрице, параметр n_2 близок к 1, при котором элемент СРЕ дает импеданс чистого или распределенного емкостного элемента. Высокие значения активного сопротивления свидетельствуют об отсутствии дефектов связующего для образцов 2 и 5.

Для описания годографа импеданса образца 6 была использована другая эквивалентная схема (представлена на рис. 1, б). В этом случае показатель степени n_1 , определяющий характер частотной зависимости импеданса, имеет значение 0,16. Для $n = 0 \pm \varepsilon$ (область R) элемент СРЕ1 описывает импеданс чистого или распределенного (искаженного) резистивного элемента. Здесь следует подчеркнуть, что даже при очень малых отклонениях n от нуля СРЕ отражает частотную зависимость, хотя и небольшую. Причем первое звено схемы отвечает за частотные свойства наполнителя, а второе – за свойства эпоксидного покрытия.

Полученные данные позволяют оценить качество эпоксидного покрытия и коррозионную стойкость образцов после моделирования агрессивного воздействия. Для образцов 1 и 3

обнаружена высокая проницаемость покрытий, связанная с образованием в композитах каналов-проводников. Остальные образцы в кислой среде проявляют лучшие укрывные свойства, которые напрямую зависят от химических свойств композитов и устойчивости полученного на их основе эпоксидного покрытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных данных и компонентов образцов покрытий 1–6 позволил установить, что смола НРЕК, используемая в качестве основы, даже в смеси с более вязкой увеличивает влагопоглощение композита при воздействии кислоты. Это приводит к проницаемости защитного слоя электролитом, что отражается на поведении годографов. В состав смолы НРЕК, относящейся к традиционно разбавленным смолам на основе бисфенола А, для уменьшения вязкости добавляется C_{12} – C_{14} алкилглицидиловый эфир, который, по всей видимости, является компонентом, ответственным за проявление наблюдаемых экспериментальных характеристик композитов.

Другим показателем, ответственным за устойчивость покрытия в агрессивной среде, является тип используемого отвердителя. Полученные данные свидетельствуют о нарушении покрытия и его проницаемости электролитом. Наилучшие показатели характерны для смолы с модифицированным аминным отвердителем М-4, получаемым на основе полиэтиленполиамиона (ПЭПА).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dagdag O., Galai M., Touhami M. Ebn, Essamri A., Elparfi A. Electrochemical study of the polymer behavior of an epoxy coating on carbon steel in 3 % NaCl using polarization curves and SIE // Journal of Materials and Environmental Science. 2016. Vol. 7. Issue 9. P. 3454–3464.
2. Xuan H.T.T., Truc T.A., Olivier M.-G., Vandermiers C., Guérit N., Pébère N. Corrosion protection mechanisms of carbon steel by an

- epoxy resin containing indole-3 butyric acid modified clay // Progress in Organic Coatings. 2010. Vol. 69. Issue 4. P. 410–416. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.08.004>
3. Azadi M., Bahrololoom M.E., Olya M.J. EIS Study of Epoxy Paints in Corrosive Environments with a New Filler: Rice Husk Ash // Progress in Color, Colorants and Coatings. 2016. Vol. 9. Issue 1. P. 53–60.

4. Volmajer N.K., Steinbücher M., Berce P., Venturini P., Gaberšček M. Electrochemical Impedance Spectroscopy Study of Waterborne Epoxy Coating Film Formation // *Coatings*. 2019. Vol. 9. Issue 4. P. 254. <https://doi.org/10.3390/coatings9040254>

5. Kharitonov D.S., Kurilo I.I., Zharskii I.M. Effect of sodium vanadate on corrosion of AD31 aluminum alloy in acid media // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017. Vol. 90. Issue 7. P. 1089–1097. <https://doi.org/10.1134/S1070427217070102>

6. Журавлёва А.С., Петрова О.Д., Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю. Влияние условий электрохимического оксидирования на морфологию и устойчивость анодных пленок ZnO // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. N 1 (108). С. 107–115.

7. Xing X., Xu X., Wang J., Hu W. Preparation and inhibition behavior of ZnMoO₄/reduced graphene oxide composite for Q235 steel in NaCl solution // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 479. P. 835–846. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.149>

8. Rodriguez-Gomez F.J., Valdelamar M.P., Vazquez A.E., Del Valle Perez P., Mata R., Miralrio A., et al. Mycophenolic acid as a corrosion inhibitor of carbon steel in 3 % wt. NaCl solution. An experimental and theoretical study // *Journal of Molecular Structure*. 2019. Vol. 1183. P. 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.12.035>

9. Bhaskaran, Pancharatna P.D., Lata S., Singh G. Imidazolium based ionic liquid as an efficient and green corrosion constraint for mild steel at acidic pH levels // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 278. P. 467–476. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.068>

10. Bambara G., Lunazzi G.C., Martini B. Electrochemische Aspekte des Versagens von organischen Überzügen // *Werkstoffe und Korrosion*. 1982. Bd. 33. N 11. S. 610–617.

11. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные материалы. М.: Металлургия, 1986. 359 с.

12. Осипов П.В., Осипчик В.С., Смотров С.А. Регулирование свойств эпоксидных олигомеров // *Успехи в химии и химической технологии*. 2008. Т. 22. N 5 (85). С. 53–56.

13. Barsoukov E., MacDonald JR. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications Second Edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Interscience, 2005. 595 p. <https://doi.org/10.1002/jrs.1558>

14. Стройнов З.Б., Графов Б.М., Саввова-Стройнова Б., Елкин В.В. Электрохимический импеданс. М.: Наука, 1991. 33 с.

15. Orazem M.E., Tribollet V. Electrochemical Impedance Spectroscopy. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Interscience, 2008. 523 p. <https://doi.org/10.1002/9780470381588>

16. Залесова О.Л., Ярославцева О.В., Соловьев А.С., Рудой В.М. Использование импедансной спектроскопии для определения влияния объемной концентрации пигмента на структурные свойства эпоксидного покрытия // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. N 14. С. 136–139.

17. Котлярова И.А., Степина И.В., Илюшкин Д.А., Цветков И.С. Оценка влияния полярности дисперсных наполнителей на структуру и водопоглощение эпоксидных материалов // *Вестник МГСУ. Научно-технический журнал по строительству и архитектуре*. 2019. Т. 14. N 6. С. 690–699. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.6.690-699>

18. Gong W., Yin X., Liu Y., Chen Y., Yang W. 2-Amino-4-(4-methoxyphenyl)-thiazole as a novel corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium // *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 126. P. 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.porg-coat.2018.10.001>

19. Mazumder M.A.J. Synthesis, characterization and electrochemical analysis of cysteine modified polymers for corrosion inhibition of mild steel in aqueous 1M HCl // *RSC Advances*. 2019. Vol. 9. Issue 8. P. 4277–4294. <https://doi.org/10.1039/C8RA09833>

REFERENCES

1. Dagdag O, Galai M, Touhami M Ebn, Es-samri A, Elparfi A. Electrochemical study of the polymer behavior of an epoxy coating on carbon steel in 3 % NaCl using polarization curves and SIE. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2016;7(9):3454–3464.

2. Xuan HTT, Truc TA, Olivier M-G, Vandermiers C, Guérit N, Pébère N. Corrosion protection mechanisms of carbon steel by an epoxy resin containing indole-3 butyric acid modified clay. *Progress in Organic Coatings*. 2010;69(4):410–416. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2010.08.004>

3. Azadi M, Bahrololoom ME, Olya MJ. EIS Study of Epoxy Paints in Corrosive Environments with a New Filler: Rice Husk Ash. *Progress in Color, Colorants and Coatings*. 2016;9(1):53–60.

4. Volmajer NK, Steinbücher M, Berce P, Venturini P, Gaberšček M. Electrochemical Impedance Spectroscopy Study of Waterborne Epoxy Coating Film Formation. *Coatings*. 2019;9(4):254. <https://doi.org/10.3390/coatings9040254>

5. Kharitonov DS, Kurilo II, Zharskii IM. Effect of sodium vanadate on corrosion of AD31 alumi-

num alloy in acid media. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2017;90(7):1089–1097. <https://doi.org/10.1134/S1070427217070102>

6. Zhuravleva AS, Petrova OD, Kuzmin MP, Kuzmina MYu. Electrochemical oxidation conditions effect on morphology and stability of ZnO anodic films. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2016;1:107–115. (In Russian)

7. Xing X, Xu X, Wang J, Hu W. Preparation and inhibition behavior of ZnMoO₄/reduced graphene oxide composite for Q235 steel in NaCl solution. *Applied Surface Science*. 2019;479:835–846. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.02.149>

8. Rodriguez-Gomez FJ, Valdelamar MP, Vazquez AE, Del Valle Perez P, Mata R, Miralrio A, et al. Mycophenolic acid as a corrosion inhibitor of carbon steel in 3 % wt. NaCl solution. An experimental and theoretical study. *Journal of Molecular Structure*. 2019;1183:168–181. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.12.035>

9. Bhaskaran, Pancharatna PD, Lata S, Singh G. Imidazolium based ionic liquid as an efficient and green corrosion constraint for mild steel at acidic pH levels. *Journal of Molecular Liquids*. 2019;278:467–476. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.068>

10. Bambara G, Lunazzi GC, Martini B. Electrochemical aspects of organic coating failure. *Werkstoffe und Korrosion* = Materials and Corrosion. 1982;33(11):610–617. (In German)

11. Tomashov ND, Chernova GP. *Theory of corrosion and corrosion-resistant constructional materials*. Moscow: Metallurgiya; 1986. 359 p. (In Russian)

12. Osipov PV, Osipchik VS, Smotrova SA. Regulation of the properties of epoxy oligomers. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2008;22(5):53–56. (In Russian)

13. Barsoukov E, MacDonald J.R. *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Interscience, 2005. 595 p. <https://doi.org/10.1002/jrs.1558>

14. Stroinov ZB, Grafov BM, Savvova-Stroinova B, Elkin VV. *Electrochemical impedance*. Moscow: Nauka; 1991. 33 p. (In Russian)

15. Orazem ME, Tribollet B. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Interscience; 2008. 523 p. <https://doi.org/10.1002/9780470381588>

16. Zalesova OL, Yaroslavtseva OV, Solov'ev AS, Rudoi VM. Use of impedance spectroscopy to determine the effect of the volume concentration of the pigment on the structural properties of the epoxy coating. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014;17(14):136–139. (In Russian)

17. Kotlyarova IA, Stepina IV, Ilyushkin DA, Tsvetkov IS. Assessment of influence of disperse filler polarity on structure and water absorption of epoxy composition. *Vestnik MGSU. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal po stroitel'stvu i arhitekture* = Vestnik MGSU (Monthly Journal on Construction and Architecture). 2019;14(6):690–699. (In Russian) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.6.690-699>

18. Gong W, Yin X, Liu Y, Chen Y, Yang W. 2-Amino-4-(4-methoxyphenyl)-thiazole as a novel corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium. *Progress in Organic Coatings*. 2019;126:150–161. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.10.001>

19. Mazumder MAJ. Synthesis, characterization and electrochemical analysis of cysteine modified polymers for corrosion inhibition of mild steel in aqueous 1M HCl. *RSC Advances*. 2019;9(8):4277–4294. <https://doi.org/10.1039/C8RA09833>

Критерии авторства

Полынский И.В., Мироненко В.В., Полынская М.М., Анциферов Е.А. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Авторы имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Contribution

Igor V. Polynskii, Vladimir. Mironenko, Mariia M. Polynskaya, Evgeniy A. Antsiferov carried out the experimental work, analyzed the experimental results and prepared the text of the manuscript. All authors have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полынский Игорь Владимирович,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: polinigor@yandex.ru

Мироненко Владимир Витальевич,
аспирант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: mironenko_vv@istu.edu

Полынская Мария Михайловна,
к.э.н., доцент кафедры управления качества
и инженерной графики,
Иркутский государственный университет
путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15,
Российская Федерация,
e-mail: marypo1976@yandex.ru

Анциферов Евгений Александрович,
к.х.н., директор Института высоких
технологий,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: antsiferov@istu.edu

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor V. Polynskii,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: polinigor@yandex.ru

Vladimir V. Mironenko,
Postgraduate Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: mironenko_vv@istu.edu

Mariia M. Polynskaya,
Cand. Sci. (Economics),
Associate Professor,
Department of Quality Management
and Engineering Graphics,
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian
Federation,
e-mail: marypo1976@yandex.ru

Evgeniy A. Antsiferov,
Cand. Sci. (Chemistry),
Director of High Technologies Institute,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
e-mail: antsiferov@istu.edu