

УДК 620.197

## Импедансная спектроскопия бесхроматных конверсионных покрытий на медьсодержащих алюминиевых сплавах Д16 и В95Т3

Д.О. Чугунов и Ю.А. Кузенков

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук  
119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4  
E-mail: [osvpkz@outlook.com](mailto:osvpkz@outlook.com)*

### Аннотация

Спектроскопия электрохимического импеданса представляет собой метод исследования различных свойств покрытий, включая конверсионные покрытия на алюминиевых сплавах. Этот метод позволяет анализировать процессы коррозии и механизмы защиты, предоставляя информацию о структуре и свойствах покрытий. Бесхроматные технологии получения покрытия методом химического оксидирования продолжают развиваться, поэтому понимание того, какие характеристики будут иметь покрытия на различных алюминиевых сплавах в зависимости от состава конвертирующего раствора и модифицирующих добавок является актуальной задачей. В данной статье с помощью метода электрохимического импеданса были исследованы ингибированные и неингибированные бесхроматные конверсионные покрытия ИФХАНАЛ-3, модифицированные 1,2,3 бензотриазолом и толилтриазолом (5-метилбензотриазолом). Было показано, что модифицирующие добавки по-разному влияют на покрытия на сплавах Д16 и В95Т3, что, вероятно, связано с различным содержанием легирующих элементов и, в первую очередь, с количеством меди в составе сплавов. При этом последующее наполнение покрытий в растворе ингибитора коррозии показывает наибольший эффект для модифицированных покрытий, если исходное покрытие обладало большей равномерности, согласно рассчитанным параметрам импеданса.

**Ключевые слова:** *импеданс, спектроскопия электрохимического импеданса, алюминиевые сплавы, конверсионные покрытия, ингибиторы коррозии, бесхроматные технологии*

Поступила в редакцию 29.05.2025 г.; После доработки 29.05.2025 г.; Принята к публикации 29.05.2025 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-2-80-90](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-2-80-90)

### Введение

Электрохимический импеданс является комплексной величиной, которая характеризует сопротивление системы к току при применении переменного

напряжения определенной частоты. Метод спектроскопии электрохимического импеданса (СЭИ) основан на измерении реакции электродной поверхности на изменение потенциала и последующем построении диаграмм Боде или Найквиста для анализа полученных данных [1]. СЭИ особенно эффективен для оценки характеристик защитных покрытий, таких как их толщина, пористость, адгезия и устойчивость к коррозии. Для интерпретации результатов используются электрические эквивалентные цепи (ЭЭС), которые моделируют поведение системы через комбинацию резисторов, конденсаторов и элементов постоянной фазы [2].

Во многих работах метод СЭИ используют для исследования защитных конверсионных покрытий на алюминиевых сплавах [3–5], в том числе, бесхроматных [6–8], так как применение конверсионные покрытий на основе соединений хрома (VI) в большинстве стран ограничено по экологическим причинам [9]. Например, авторы [10] исследовали защитные свойства цериевого конверсионного покрытия на алюминиевом сплаве 6101, относящийся к системе сплавов Al-Mg-Si, в щелочной среде. В ходе исследований с помощью метода СЭИ они пришли к выводу, что адгезия покрытия снижается, но оно продолжает защищать поверхность сплава даже после 72 часов выдержки в растворе NaOH. В другой работе [11] рассматривалось влияние 3-амино-5-меркапто-1,2,4-триазола на его способность защищать медьсодержащий алюминиевый сплав 2024. В своих исследованиях авторы выяснили максимальную эффективную концентрацию ингибитора в 1,5 г/л путем оценки размера ёмкостной петли, а также определили эффективность коррозионной защиты покрытия по сравнению с неингибированным образцом. При этом отмечается, что с ростом толщины оксидной плёнки увеличивается сопротивление покрытия, и уменьшаются его ёмкостные характеристики. В статье [12] методом СЭИ было показано, что защитное золь-гелевое покрытие на основе Si и Zr состоит из двух слоёв. При этом внешний слой таких покрытий является пористым и сопротивление пленки увеличивается от внешнего слоя к внутреннему, более плотному и, следовательно, имеющему более выраженные барьерные свойства. Эффективность метода СЭИ для оценки защитных свойств покрытий подтверждается в работе [13], в которой изучено влияние ингибитора на основе  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  на анодированном алюминии с эпоксидным покрытием. В ходе исследования было выявлено, что данный ингибитор позволяет залечивать повреждения покрытия, тем самым сохраняя его защитный эффект.

В наших работах [14–17] изучались бесхроматные ингибированные покрытия ИФХАНАЛ-3 и их модификации на различных алюминиевых сплавах разными методами, такими как микроскопия, рентгеноспектральный анализ, поляризационные измерения и коррозионные испытания. Для более полного понимания морфологии покрытий, электрохимических процессов на их поверхности и защитных свойств метод СЭИ может дать новые данные.

## Методика эксперимента

Конверсионные покрытия получали на плоских образцах из алюминиевых сплавов Д16 и В95Т3 (20×100 мм). Состав сплавов приведён в таблице 1.

**Таблица 1.** Элементный состав исследуемых алюминиевых сплавов.

Сплав	Элементы, % масс.					
	Mg	Cu	Zn	Si	Mn	Fe
Д16	1,8	3,8–4,9	2,5	<0,5	0,9	<0,5
В95Т3	1,8–2,8	1,4–2	5–7	<0,5	0,2–0,6	<0,5

\*остальное Al

Образцы шлифовали наждачной бумагой разной зернистости, обезжиривали этанолом, травили 1 мин в 10%-ном растворе NaOH ( $t=65–67^{\circ}\text{C}$ ), промывали горячей дистиллированной водой, осветляли 3 мин в 50%-ном растворе  $\text{HNO}_3$ , снова промывали водой и сушили. После предварительной обработки образцы погружали в конвертирующий раствор на 50 мин. Покрытия формировали в конвертирующем составе ИФХАНАЛ-3 (на основе боратов) при температуре  $80^{\circ}\text{C}$  и pH 12 без и с добавлением модифицирующих добавок – 1,2,3-бензотриазол (БТА), 5-метилбензотриазол (5-мБТА) и Трилон Б. После оксидирования образцы вынимали из раствора, промывали дистиллированной водой, сушили на воздухе при комнатной температуре не менее 12 ч и взвешивали.

Толщину покрытий оценивали по потере массы после 15 мин травления образцов в стандартном хроматно-фосфатном растворе (20 г/л  $\text{CrO}_3$  и 50 г/л  $\text{H}_3\text{PO}_4$  при  $t=80^{\circ}\text{C}$ ). Далее образцы промывали дистиллированной водой, сушили и через сутки взвешивали. Толщину покрытий (мкм) рассчитывали по формуле (с учетом поправки на образцы–свидетели):

$$h = \frac{m_0 - m_n}{S_{\text{sample}} \cdot \rho} \cdot 10^7 \quad (1)$$

где  $m_0$  – масса образца с покрытием, г;  $m_n$  – масса образца после снятия покрытия, г;  $\rho$  – плотность покрытия, г/см<sup>3</sup>;  $S_{\text{обр}}$  – площадь покрытия на образце, см<sup>2</sup>.

После оксидирования покрытия наполняли при погружении образцов на 1 ч в горячую дистиллированную воду ( $98–100^{\circ}\text{C}$ ) с ингибитором коррозии (на основе карбоксилатов).

Спектроскопию электрохимического импеданса на образцах с покрытиями (рабочая поверхность 0,5 см<sup>2</sup>) снимали на приборе IPC-Pro MF с модулем FRA-2 (Россия) в диапазоне частот от 60 кГц до 0,1 Гц в боратном буферном растворе (pH 7,4), при  $t=20\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Для обработки результатов СЭИ в терминах эквивалентных схем использовалась программа Dummy Circuits Solver.

Для расчетов использовали эквивалентную схема Мансфельда на рисунке 1. Схема содержит следующие элементы:  $R_s$  – сопротивление раствора;  $CPE_f$  – элемент постоянной фазы (CPE), описывающий емкость покрытия;  $R_f$  – сопротивление покрытия;  $CPE_{dl}$  – элемент постоянной фазы, описывающий

емкость двойного электрического слоя, очевидно связанного с процессами, происходящими в неоднородной по структуре поверхностной пленке,  $R_{ct}$  – сопротивление переноса заряда на границе раздела фаз электрод/электролит.

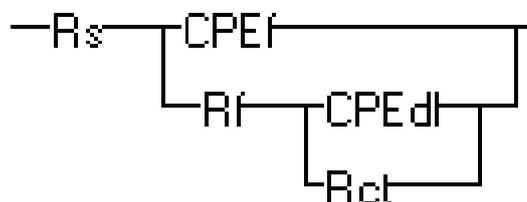


Рисунок 1. Электрическая эквивалентная схема Мансфельда (ЭЭС).

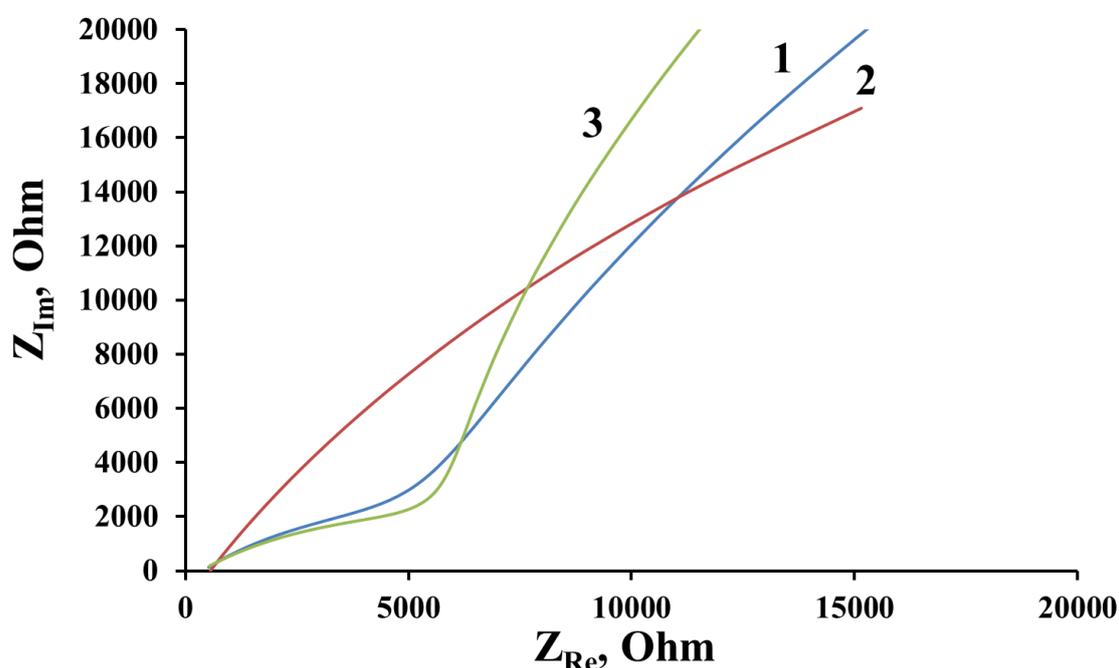
## Результаты и обсуждение

Важными параметрами, которые используются при определении характеристик получаемых покрытий, являются сопротивление покрытия  $R_f$ , позволяющее определить защитную способность пленки, и параметр  $n$ , входящий в состав элемента постоянной фазы  $CPE_f$ , по значению которого можно оценить однородность покрытия и его отклонение от идеальной емкости (таблица 2).

Из результатов, представленных на рисунке 2 и в таблице 2, полученных с помощью СЭИ, видно, что наибольшим сопротивлением на сплаве Д16 обладают покрытия, полученные в конвертирующих составах ИФХАНАЛ-3 и ИФХАНАЛ-3+БТА. При этом толщина покрытий после добавления в раствор БТА практически не меняется. Однако стоит отметить рост параметра  $n$ , что говорит о снижении пористости покрытия с добавлением БТА в сравнении с немодифицированным покрытием. Напротив, добавление в конвертирующий состав 5-мБТА приводит к уменьшению значения параметра  $n$ , что свидетельствует об увеличении пористости и, соответственно, ухудшает его защитные свойства по сравнению с покрытием, полученным в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА.

Таблица 2. Результаты расчёта импедансных измерений и толщина для неингибированных покрытий на сплаве Д16 согласно ЭЭС Мансфельда.

Конвертирующий состав	$CPE_f Q_0$	$CPE_f n$	$R_f, \text{кОм}\cdot\text{см}^2$	Толщина, мкм
ИФХАНАЛ-3	$6,19 \cdot 10^{-6}$	0,532	9,2	2,3
ИФХАНАЛ-3+БТА	$4,37 \cdot 10^{-5}$	0,723	10,0	2,1
ИФХАНАЛ-3+5-мБТА	$9,76 \cdot 10^{-6}$	0,467	7,4	2

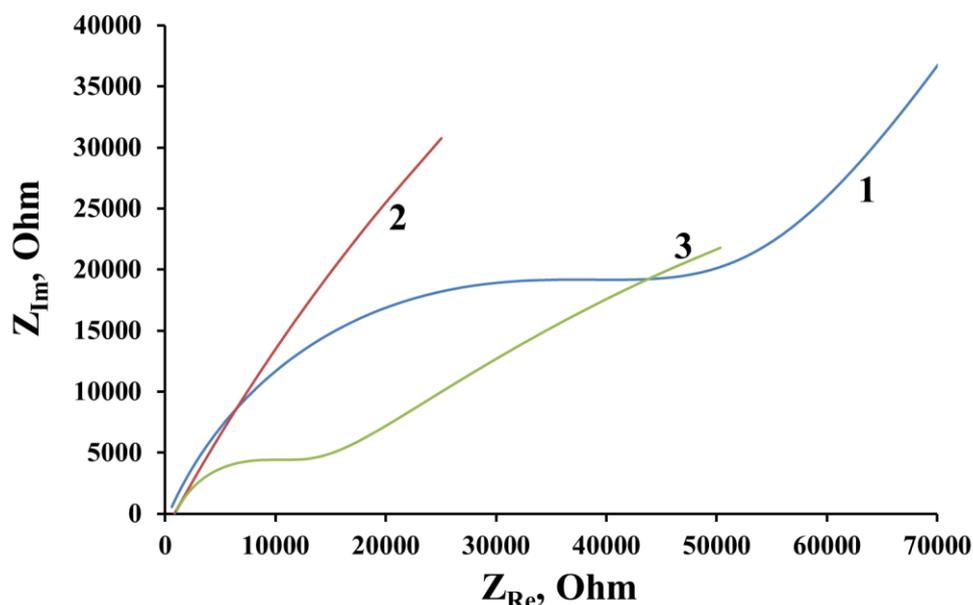


**Рисунок 2.** Диаграммы Найквиста неингибированных конверсионных покрытий на алюминиевом сплаве Д16: 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА, 3 – ИФХАНАЛ-3+5-мБТА.

Наполнение покрытий на сплаве Д16 в растворе ингибитора коррозии (таблица 3, рисунок 3) способствует повышению их защитных свойств. При этом, чем выше изначальная однородность поверхность (параметр  $n$ ), тем более эффективно работает модифицирующая добавка и тем более эффективно происходит адсорбция ингибитора коррозии. Так для исходного немодифицированного покрытия значение  $R_f$  после наполнения возрастает, примерно, в 6 раз, для покрытия, полученного в растворе ИФХАНАЛ-3+5-мБТА, где значение параметра  $n$  минимально – в 2,4 раза, а для покрытия с наибольшим значением параметра  $n$ , полученного в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА, – в 27 раз.

**Таблица 3.** Результаты расчёта импедансных измерений и толщина для ингибированных покрытий на сплаве Д16 согласно ЭЭС Мансфельда

Сплав	$CPE_f Q_0$	$CPE_f n$	$R_f$ , кОм·см <sup>2</sup>	Толщина, мкм
ИФХАНАЛ-3	$1,64 \cdot 10^{-7}$	0,714	55,1	2,3
ИФХАНАЛ-3+БТА	$2,84 \cdot 10^{-5}$	0,651	279,8	2,1
ИФХАНАЛ-3+5-мБТА	$3,65 \cdot 10^{-7}$	0,696	17,7	2

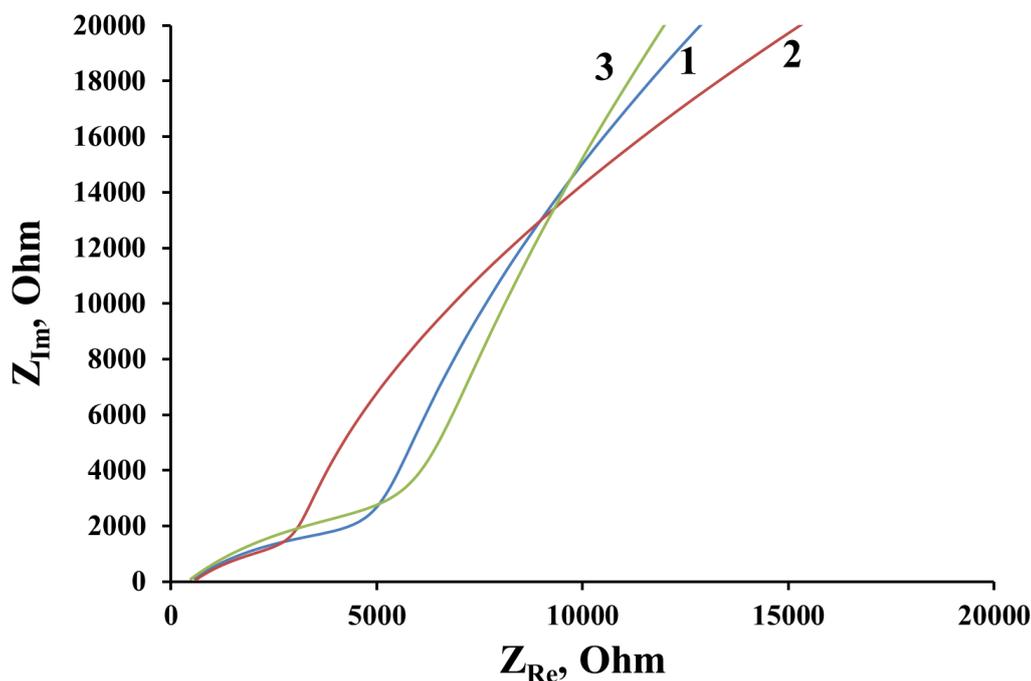


**Рисунок 3.** Диаграммы Найквиста ингибированных конверсионных покрытий на алюминиевом сплаве Д16: 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА, 3 – ИФХАНАЛ-3+5-мБТА, 4 – ИФХАНАЛ-3+Трилон Б.

В отличие от сплава Д16, содержание меди в сплаве В95 ниже, что уменьшает эффективность добавки БТА. Однако здесь следует отметить, что добавление 5-мБТА в конвертирующий состав при оксидировании сплава В95 работает иначе, чем для покрытий на сплаве Д16. В случае сплава В95 покрытие, полученное в растворе ИФХАНАЛ-3+5-мБТА, обладает несколько большим значением параметра  $n$ , чем немодифицированное покрытие и покрытие, полученное в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА, а также приводит к существенному снижению толщины оксидной плёнки (таблица 4, рисунок 4). Получается, что такое покрытие обладает большей однородностью и несколько большими защитными свойствами, что подтверждает значение параметра  $R_f$ .

**Таблица 4.** Результаты расчёта импедансных измерений и толщина для неингибированных покрытий на сплаве В95Т3 согласно ЭЭС Мансфельда

Сплав	$CPE_f Q_0$	$CPE_f n$	$R_f, \text{кОм}\cdot\text{см}^2$	Толщина, мкм
ИФХАНАЛ-3	$7,70 \cdot 10^{-6}$	0,515	7,6	1,3
ИФХАНАЛ-3+БТА	$1,28 \cdot 10^{-5}$	0,525	5,4	1,7
ИФХАНАЛ-3+5-мБТА	$2,83 \cdot 10^{-6}$	0,622	12,7	0,8

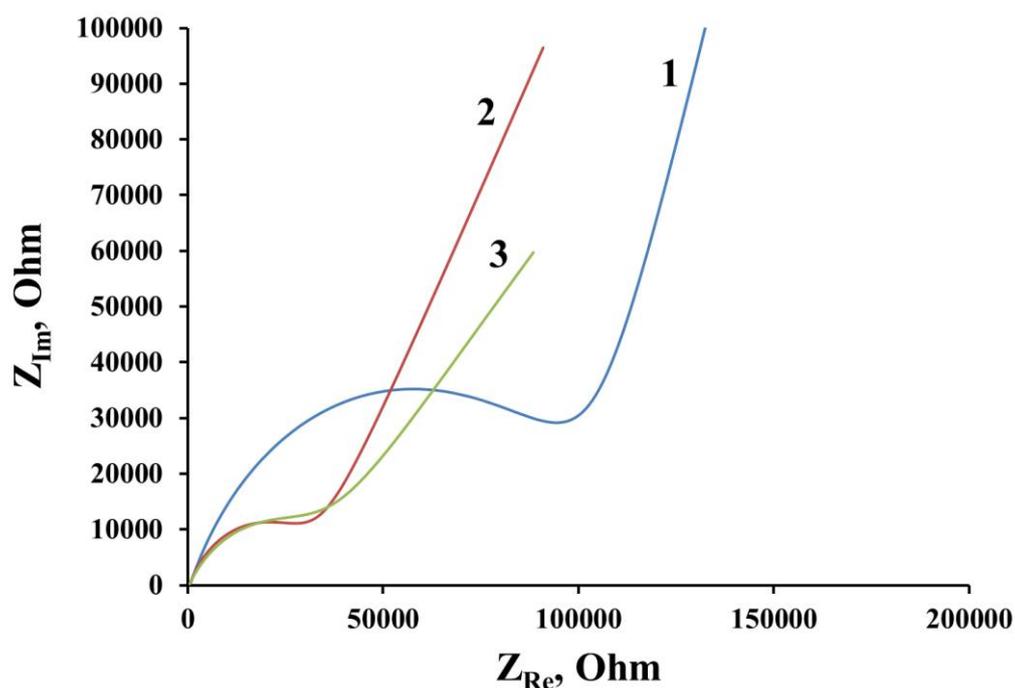


**Рисунок 4.** Диаграммы Найквиста неингибированных конверсионных покрытий на алюминиевом сплаве В95Т3: 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА, 3 – ИФХАНАЛ-3+5-мБТА, 4 – ИФХАНАЛ-3+Трилон Б.

Как видно из таблицы 5 и рисунка 5, наполнение покрытий на сплаве В95 также работает по-другому, нежели для покрытий на сплаве Д16. Наибольший эффект увеличения защитных свойств от обработки в растворе ингибитора коррозии наблюдается для немодифицированного покрытия – параметр  $R_f$  увеличивается в 15 раз. Изначальное покрытие, полученное в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА, обладает большой пористостью, что, как было показано на покрытиях на сплаве Д16, приводит к снижению эффективности взаимодействия БТА и ингибитора коррозии. Поэтому рост защитных свойств покрытий на сплаве В95 после наполнения в растворе ингибитора коррозии существенно ниже для модифицированных покрытий: параметр  $R_f$  увеличивается в 7 раз для покрытия, полученного в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА, и менее, чем в 2 раза, для покрытия, полученного в растворе ИФХАНАЛ-3+5-мБТА. В последнем случае важную роль в снижении эффективности ингибитора играет уменьшение толщины покрытия.

**Таблица 5.** Результаты расчёта импедансных измерений и толщина для ингибированных покрытий на сплаве В95Т3 согласно ЭЭС Мансфельда

Сплав	$CPE_f Q_0$	$CPE_f n$	$R_f$ , кОм·см <sup>2</sup>	Толщина, мкм
ИФХАНАЛ-3	$2,57 \cdot 10^{-7}$	0,719	108,8	1,3
ИФХАНАЛ-3+БТА	$4,60 \cdot 10^{-7}$	0,699	34,4	1,7
ИФХАНАЛ-3+5-мБТА	$8,6 \cdot 10^{-7}$	0,615	22,5	0,8



**Рисунок 5.** Диаграммы Найквиста ингибированных конверсионных покрытий на алюминиевом сплаве В95Т3: 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА, 3 – ИФХАНАЛ-3+5-мБТА, 4 – ИФХАНАЛ-3+Трилон Б.

## Выводы

1. Добавление БТА и 5-мБТА в бесхроматный конвертирующий состав ИФХАНАЛ-3 оказывает различное влияние на покрытия на сплавах Д16 и В95. На сплаве Д16 БТА значительно повышает эффективность покрытия ИФХАНАЛ-3, тогда как на сплаве В95Т3 из-за меньшего содержания меди её эффективность снижается, и более предпочтительной становится модификация 5-мБТА.
2. Ингибитор коррозии тем лучше взаимодействуют с модифицирующими добавками БТА и 5-мБТА в составе покрытий, чем выше однородность покрытия (более высокое значение параметра  $n$ ). Поэтому наибольшие защитные свойства среди исследованных покрытий демонстрирует покрытие, полученное на сплаве Д16 в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА и наполненное в растворе ингибитора коррозии.

## Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## Список литературы

1. A. Lasia, *Electrochemical Impedance Spectroscopy and its Applications*, Springer, 2014, 367 p. doi: [10.1007/978-1-4614-8933-7](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8933-7)
2. M.E. Orazem and B. Tribollet, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, Wiley, 2008, 525 p. doi: [10.1002/9780470381588](https://doi.org/10.1002/9780470381588)

3. A.S. Nguyen and N. Pébère, A local electrochemical impedance study of the self-healing properties of waterborne coatings on 2024 aluminium alloy, *Electrochim. Acta*, 2016, **222**, 1806–1817. doi: [10.1016/j.electacta.2016.11.152](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.11.152)
4. E.V. Parfenov, A.L. Yerokhin and A. Matthews, Impedance spectroscopy characterisation of PEO process and coatings on aluminium, *Thin Solid Films*, 2007, **516**, no. 2–4, 428–432. doi: [10.1016/j.tsf.2007.06.169](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.06.169)
5. И.М. Медведев, А.Е. Кутырев и И.А. Волков, Исследование влияния наличия коррозионных повреждений на спектры импеданса анодно-оксидных покрытий, *Электрохимия*, 2022, **58**, № 6, 261–272. doi: [10.31857/S042485702206007X](https://doi.org/10.31857/S042485702206007X)
6. A.S. Nguyen, N. Causse, M. Musiani, M.E. Orazem, N. Pébère and B. Tribollet, Determination of water uptake in organic coatings deposited on 2024 aluminium alloy: Comparison between impedance measurements and gravimetry, *Prog. Org. Coat.*, 2017, **112**, 93–100. doi: [10.1016/j.porgcoat.2017.07.004](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.07.004)
7. T. Zhang, H. Wang, Y. Li, X. Qian, B. Li, W. Yu, X. Zhang, J. Lin and H. Tang, Investigation of the microstructure, growth mechanism, and corrosion behavior of a new Zr–Ti conversion coating on 6016 aluminum alloy, *J. Mater. Res. Technol.*, 2024, **30**, 7585–7596. doi: [10.1016/j.jmrt.2024.05.138](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.138)
8. H.H. Zhang, X. Zhang, H. Bian, L. Zhang, Y. Chen, Y. Yang and Z. Zhang, Superhydrophobic and self-healing silane-ceria composite coating implanted with 1,5-naphthalenediol inhibitor for corrosion protection of AA2024-T3 aluminum alloy, *Surf. Coat. Technol.*, 2024, **476**, 130256. doi: [10.1016/j.surfcoat.2023.130256](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130256)
9. Commission Directive 2001/59/EC of 6 August 2001 Adapting to technical progress for the 28th time Council Directive 67/548/EEC on the approximation of laws, regulations and administrative provisions concerning the classification, packaging and labeling of hazardous substances relation to the EEA). Official Journal L 225, 21/08/2001, p. 0001–0333.
10. A.R. Khan, H.-J. Zhang, Z. Jun, S.M. Eldin, N. S. Alsaieri and K.M. Katubi, Electrochemical corrosion resistance of aluminum alloy 6101 with cerium-based coatings in an alkaline environment, *Front. Chem.*, 2022, **10**, 1066958. doi: <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.1066958>
11. X. Guo, J. Wang, L. Huang, Y. Wang, L. Ma, D. Zhang and L. Ma, Corrosion inhibition and adsorption process of 3-amino-5-mercapto-1,2,4-triazole on aluminium alloy: Experimental and Theoretical Studies, *Front. Mater.*, 2022, **9**, 874899 doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.874899>
12. P. Rodič, S. Zanna, I. Milošev and P. Marcus, Degradation of sol-gel acrylic coatings based on Si and Zr investigated using electrochemical impedance, infrared and X-Ray Photoelectron Spectroscopies, *Front. Mater.*, 2021, **8**, 756447 doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.756447>
13. B. Minhas, S. Dino, L. Huang and D. Wu, Active corrosion protection by epoxy coating on Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-pretreated anodized aluminum alloy 2024-T3, *Front. Mater.*, 2022, **8**, 804328 doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.804328>

- 
14. Yu.A. Kuzenkov, D.O. Chugunov, S.V. Oleynik and V.L. Voititsky, Protective chromate-free conversion coatings on AMg6 aluminum alloy with different types of surface treatment, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2022, **11**, no. 2, 541–552. doi: [10.17675/2305-6894-2022-11-2-5](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2022-11-2-5)
  15. A.S. Koryakin, Yu.A. Kuzenkov, S.V. Oleinik and V.L. Voititsky, Chromium-free conversion protective coatings on 1424 aluminum alloy, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2020, **56**, no. 7, 1305–1310. doi: [10.1134/s2070205120070096](https://doi.org/10.1134/s2070205120070096)
  16. Yu.A. Kuzenkov, D.O. Chugunov, V.A. Karpov, T.T. Trang, S.V. Bel'skii and N.V. Thang, Protective properties of chromate-free conversion coatings for copper-containing aluminum alloys in tropical climates, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2024, **13**, no. 3, 1664–1672. doi: [10.17675/2305-6894-2024-13-3-17](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-3-17)
  17. Ю.Б. Макарычев, Ю.А. Кузенков, Д.О. Чугунов, О.Ю. Графов и А.Д. Алиев, Комбинированное нанесение полимерных пленок на основе силанов для защиты алюминиевого сплава АМГ3 от коррозии, *Коррозия: защита материалов и методы исследования*, 2024, **2**, № 2, 108–121. doi: [10.61852/2949-3412-2024-2-2-108-121](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2024-2-2-108-121)

---

## Impedance spectroscopy of chromate-free conversion coatings on copper-containing aluminum alloys D16 and B95T3

D.O. Chugunov and Yu.A. Kuzenkov

*Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences, 31-4, Leninsky Prospect, 119071, Moscow, Russia*

*e-mail: [osvpkz@outlook.com](mailto:osvpkz@outlook.com)*

### Abstract

Electrochemical impedance spectroscopy is a method for studying various properties of coatings, including conversion coatings on aluminum alloys. This method allows to analyze corrosion processes and protection mechanisms, providing information about the structure and properties of coatings. Chromate-free coating technologies by chemical oxidation continue to evolve, so understanding what characteristics coatings on various aluminum alloys will have, depending on the composition of the converting solution and modifying additives, is an urgent task. In this article, inhibited and non-inhibited chromate-free conversion coatings of IFKHANAL-3 modified with 1,2,3-benzotriazole and tolyltriazole (5-methylbenzotriazole) were studied using the electrochemical impedance method. It has been shown that modifying additives have different effects on coatings on D16 and V95T3 alloys, which is probably due to the different content of alloying elements and, first of all, the amount of copper in the alloys. In this case, the subsequent filling of coatings in a corrosion inhibitor solution shows the greatest effect for modified coatings if the initial coating had greater uniformity, according to the calculated impedance parameters.

**Keywords:** *impedance, electrochemical impedance spectroscopy, aluminum alloys, conversion coatings, corrosion inhibitors, chromate-free technologies*