

УДК 620.197

Исследование электрохимических свойств ингибированных бесхроматных конверсионных покрытий на алюминиевом сплаве АМгЗ при экспозиции в камере влажности

Ю.А. Кузенков,* Д.О. Чугунов, Н.Г. Ануфриев и С.Ю. Рыбаков

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

*Email: osvpkz@outlook.com

Аннотация

Алюминиевые сплавы системы Al-Mg обладают довольно высокой коррозионной стойкостью, однако исследования показывают, что даже в атмосферных условиях для них характерна питтинговая коррозия. Поэтому для их защиты используются различные покрытия, в том числе, полученные методом химического оксидирования. В данной работе были проведены исследования бесхроматных ингибированных конверсионных покрытий ИФХАНАЛ-3 в камере влажности Г-4 в сочетании со спектроскопией электрохимического импеданса, кондуктометрией и рентгеноспектральным микроанализом. Это позволило выявить факторы начала коррозионного процесса и, в частности, показать отсутствие десорбции ингибитора коррозии в процессе испытаний. При этом было показано, что введение в конвертирующий состав 1,2,3-бензотриазола способствуют как увеличению активного сопротивления (R_f) оксидной плёнки, так и более позднему появлению первых коррозионных поражений на покрытии в сравнении с немодифицированными покрытиями. С помощью метода кондуктометрии было показано, что в процессе испытаний в камере влажности наблюдается снижение пористости покрытий.

Ключевые слова: алюминий, конверсионные покрытия, бесхроматные технологии, питтинговая коррозия, ингибиторы коррозии, камера влажности

Поступила в редакцию 15.09.2025 г.; После доработки 15.09.2025 г.; Принята к публикации 15.09.2025 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-3-94-105](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-3-94-105)

Введение

Благодаря целому ряду качеств, включая низкую плотность, хорошие прочностные свойства, лёгкость обработки, декоративные свойства, алюминиевые сплавы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, в том числе, в архитектуре. Хотя величина общей коррозии алюминиевых сплавов в атмосферных условиях, зачастую, незначительна [1–3], серьёзную угрозу для них представляет питтинговая коррозия [3, 4]. Поэтому для защиты алюминиевых

сплавов часто используют различные конверсионные покрытия, одними из которых являются покрытия, полученные методом химического оксидирования. Основной проблемой таких покрытий является то, что по-прежнему для их получения используются соединения хрома (VI), которые являются экологически опасными [5].

В качестве альтернативы хроматам исследуются конвертирующие составы на основе церия, циркония и ряда других элементов. Например, в [6] исследовали методы борьбы с растрескиванием цериевых покрытий. Это частая проблема для них [7, 8]. Для её решения применяют обработку покрытий в растворах фосфатов или используют термообработку. Авторы исследования [6] показали, что такой природный полимер как хитозан при низкой концентрации может заполнять собой трещины и снижать шероховатость получаемых цериевых покрытий, а при более высоких концентрациях – уменьшать количество образующихся трещин. Для покрытий, полученных в растворах на основе гексафторида циркония, как показано в [9], недостатком является отсутствие торможения катодной реакции при коррозионном процессе. Это приводит к тому, что такие покрытия могут иметь негативный эффект при нанесении последующего слоя лакокрасочного покрытия. Нами также были исследованы ряд альтернатив традиционным хроматам, а ключевую роль в разработанных конвертирующих составах ИФХАНАЛ играют экологически безопасные ингибиторы коррозии, которые добавляются при нанесении покрытий и при последующей их обработке. Такие композиционные покрытия показывают высокие защитные свойства, на уровне традиционных хроматных покрытий, и хорошо взаимодействуют с лакокрасочными покрытиями [10–14].

Качественные методы оценки защитных свойств покрытий, такие как натурные испытания, испытания в камере солевого тумана и камере влажности показывают время до разрушения покрытия, однако ничего не могут сказать о том, что происходит с покрытием в течение испытаний. Только использование электрохимических методов позволяет раскрыть процессы, происходящие в самом покрытии [15, 16]. Однако исследований конверсионных покрытий, в которых комбинируют коррозионные испытания с электрохимическими методами, очень мало. В [17] были изучены анодные покрытия на алюминиевом сплаве 1050 во время натурных испытаний на нескольких коррозионных станциях. Спектры электрохимического импеданса (СЭИ) снимали на образцах после 24, 36 и 42 месяцев испытаний. Было показано, что для анодных покрытий, в целом, характерно увеличение барьерных свойств с течением времени, и это более выражено для толстых покрытий (20 и более мкм). Эти результаты были подтверждены в [18], где анодные покрытия на ряде алюминиевых сплавов экспонировались в приморской атмосфере. Был сделан вывод о том, что гидратация оксидного слоя является ключевым фактором при увеличении параметра сопротивления СЭИ в течение натурных испытаний. В [19] с помощью капельного метода по ГОСТ 9.302–88 и метода кондуктометрии исследовались конверсионные покрытия ИФХАНАЛ-3 до и после натурных испытаний во

Вьетнаме, г. Нячанг. Было показано, что отсутствие промежуточных исследований не позволяет построить с высокой степенью корреляции зависимость времени защитного действия покрытий от площади коррозионных поражений.

В настоящей работе ингибированные конверсионные покрытия ИФХАНАЛ-3 на алюминиевом сплаве АМг3 были исследованы электрохимическими методами в процессе ускоренных коррозионных испытаний в камере влажности Г-4 с целью определения факторов, влияющих на начало коррозионного процесса в таких условиях.

Методика эксперимента

Конверсионные покрытия получали на плоских образцах из алюминиевого сплава АМг3 (50×20 мм). Состав сплава приведён в таблице 1. 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 HNO_3 , снова промывали водой и сушили. После предварительной обработки образцы погружали в конвертирующие растворы при $t=80^{\circ}\text{C}$ на 10 мин. После выдержки в течение суток в эксикаторе над хлористым кальцием образцы погружали в конвертирующий раствор ИФХАНАЛ-3 (на основе боратов) без и с добавлением 1,2,3-бензотриазол (БТА).

Таблица 1. Содержание легирующих элементов (%масс) в сплаве АМг3 по ГОСТ 4784-97.

Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Al
до 0,5	0,5–0,8	0,3–0,6	до 0,1	3,2–3,8	до 0,2	остальное

После оксидирования образцы вынимали из раствора, промывали дистиллированной водой, сушили на воздухе при комнатной температуре не менее 12 ч.

Толщину покрытий оценивали по потере его массы после 15 мин травления образцов в стандартном хроматно-фосфатном растворе (20 г/л CrO_3 и 50 г/л H_3PO_4 при $t=80^{\circ}\text{C}$). Далее образцы промывали дистиллированной водой, сушили и через сутки взвешивали. Толщину покрытий (мкм) рассчитывали по формуле:

$$h = \frac{m_0 - m_n}{S \cdot d} \cdot 10^7 \quad (1)$$

где m_0 – масса образца с покрытием, г; m_n – масса образца после снятия покрытия, г; d – плотность покрытия, г/см³; S – площадь покрытия на образце, см².

Наполнение (уплотнение) плёнки проводили при погружении образцов с покрытием в горячую дистиллированную воду (98–100^oC) в присутствии ингибитора коррозии (на основе карбоксилатов) в течение 60 мин.

Анодные поляризационные кривые на образцах с покрытиями (рабочая поверхность 0,5 см²) снимали в боратном буферном растворе (рН 7,4),

содержащем 0,01М NaCl при $t=20\pm 2^\circ\text{C}$. Поляризацию электродов (1 мВ/с) начинали с потенциала коррозии после 20–30 мин экспозиции их в исследуемом растворе.

Коррозионные испытания конверсионных покрытий по ГОСТ 9.913–90 в камере влажности Г-4 (15 сут) проводили при следующих условиях – 8 ч образцы находились в камере при 100% относительной влажности и $t=40^\circ\text{C}$, а последующие 16 ч при комнатной температуре в условиях конденсации влаги.

Спектроскопию электрохимического импеданса на образцах с покрытиями (рабочая поверхность 0,5 см²) 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 (рН 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 схему Мансфельда (рисунок 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.

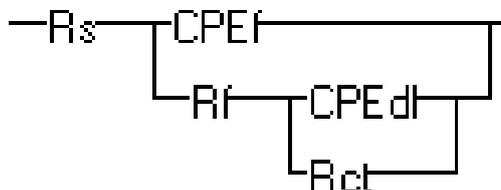


Рисунок 1. Электрическая эквивалентная схема Мансфельда (ЭЭС)

Для измерения удельного электросопротивления (ρ) методом кондуктометрии системы алюминиевого сплава с покрытием и боратным буфером использовалась цилиндрическая ячейка из тефлона с внутренним диаметром 6,5 мм, длиной 24 мм, к торцам которой прикреплялись резиновые прокладки и устанавливались по 2 образца из алюминиевого сплава с одинаковой химической обработкой. Измеряемые участки образцов предварительно обезжиривали этанолом и сушили. Образцы и ячейка стягивались винтами для герметизации с использованием изолирующих накладок. К зачищенным участкам вокруг отверстий в верхней части образцов крепились токоподводы, к которым по двухэлектродной схеме подключался кондуктометр «Эксперт-002» (ООО «Эконикс-Эксперт», г. Москва), в отверстие прижимной ячейки заливался боратный буферный раствор с рН 7,2. Измерения проводились на переменном токе при частоте 1 кГц, напряжении 0,3 В. Запись результатов измерений проводилась с помощью программы EXP2PR ежесекундно в течение 1ч при температуре $20\pm 1^\circ\text{C}$.

Состав покрытий на поверхности сплава изучали методом рентгеноспектрального микроанализа (САМЕВАХ), энергия электронного пучка –

15 кВ, размер анализируемого пятна на образце – $50 \times 50 \text{ мкм}^2$, глубина анализа поверхности 1 мкм . Микрофотографии были получены на сканирующем электронном микроскопе с термоэмиссионным катодом WIN SEM A6000.

Экспериментальные результаты и обсуждение

При оксидировании образцов сплава АМгЗ в конвертирующем составе ИФХАНАЛ-3 на их поверхности образуются конверсионные покрытия толщиной $1,5 \pm 0,2 \text{ мкм}$. По потенциалу питтингообразования ($E_{\text{пит}}$) они сравнимы с образцом без покрытия, но имеют близкие к нулю токи коррозии в области пассивного состояния (рисунок 1). При введении в конвертирующий состав БТА толщина оксидной плёнки уменьшается до 1 мкм , что, вероятно, приводит к росту токов в области пассивного состояния на поляризационной кривой. Однако после наполнения покрытия в растворе ингибитора коррозии именно покрытие с БТА показывает наилучший защитный эффект – $E_{\text{пит}}$ сдвигается в положительную сторону на $\sim 800 \text{ мВ}$ в сравнении с неингибированным покрытием. Как было показано ранее [12], такой эффект, вероятно, связан с синергетическим действием БТА в составе покрытия и карбоксилатным ингибитором коррозии, который адсорбируется в покрытии в процессе наполнения.

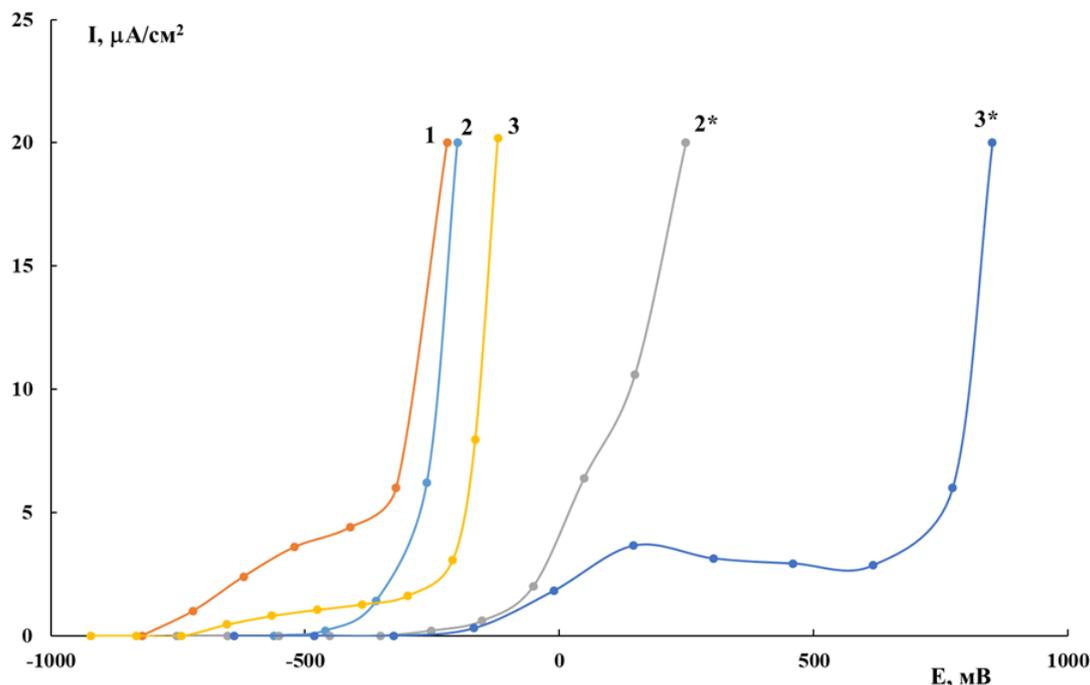


Рисунок 1. Анодные поляризационные кривые на сплаве АМгЗ в боратном буферном растворе, содержащем $0,01 \text{ M NaCl}$ ($\text{pH } 7,4$), без покрытия (1), для исходных покрытий и после наполнения в растворе ингибитора коррозии (*): 2 – ИФХАНАЛ-3, 3 – ИФХАНАЛ-3+БТА.

Полученные покрытия были поставлены в камеру влажности Г-4, откуда периодически извлекались, осматривались на наличие коррозионных повреждений (питтингов) и исследовались методом СЭИ. Так как ключевую роль

в обеспечении защитного эффекта покрытий играет ингибитор коррозии, то предполагалось, что именно десорбция ингибитора в процессе испытаний станет фактором начала коррозионного процесса. Однако согласно полученным данным параметр R_f , показывающий активное сопротивление оксидной плёнки, для исходного ингибированного покрытия хоть и имеет отрицательный тренд с течением времени испытаний, но при этом никак не коррелирует с образованием первых питтингов на покрытии (рисунок 2). Аналогично для покрытия, полученного в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА, где наблюдаются более высокие значения R_f и больший период до появления первых питтингов, значения параметра R_f с течением времени испытаний в камере влажности не характеризуют начало коррозионного процесса. Таким образом, питтинги на покрытии образуются не вследствие десорбции ингибитора коррозии.

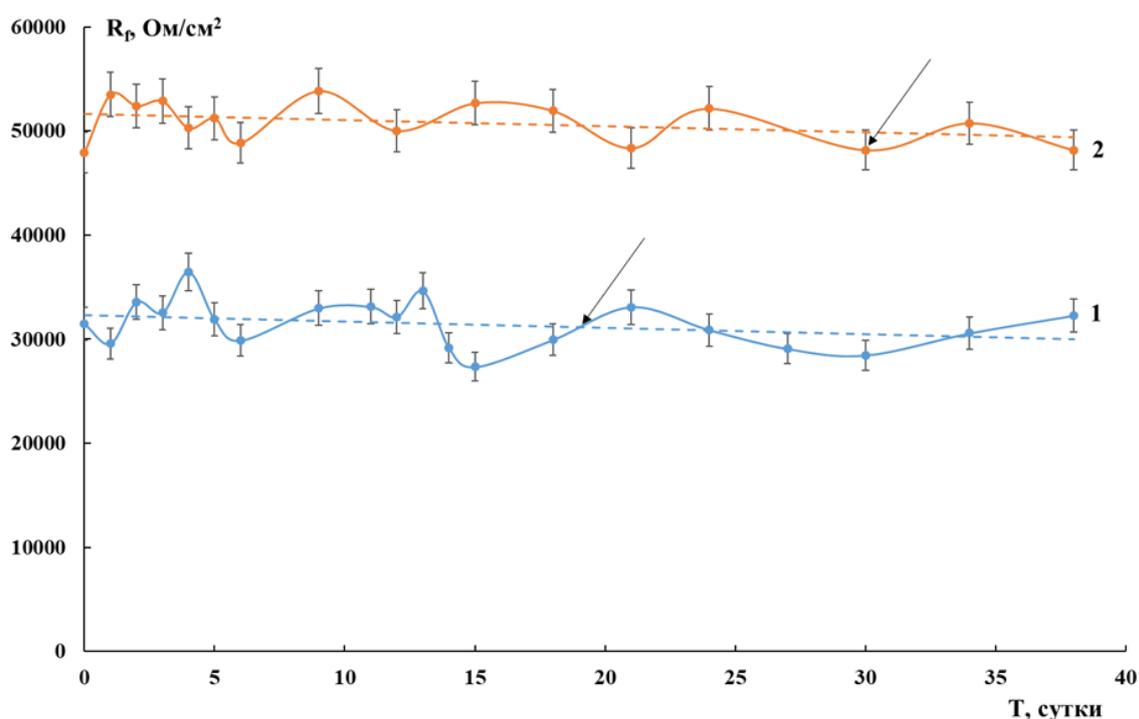


Рисунок 2. Зависимость сопротивления покрытий от времени нахождения образцов с ингибированными покрытиями в камере влажности: 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА. Пунктиром показаны линии тренда. Стрелки указывают время появления первых коррозионных поражения (питтингов).

Это подтверждается исследованием покрытий методом кондуктометрии. Выбор метода кондуктометрии обусловлен тем, что оксидные покрытия обладают высоким удельным сопротивлением, а удельное электросопротивление системы «алюминиевый сплав–покрытие–боратный буфер–покрытие–алюминиевый сплав» должно быть пропорционально защитной способности покрытий и их пористости. Из рисунка 3 видно, что удельное сопротивление покрытий ИФХАНАЛ-3 и ИФХАНАЛ-3+БТА растёт, примерно, в 1,7 раза в течение испытаний в камере влажности в сравнении с исходным покрытием. Это говорит о

том, что пористость покрытия уменьшается за счёт его гидратации, тогда как в случае десорбции ингибитора коррозии удельное сопротивление имело бы отрицательный тренд. При этом зависимости удельного сопротивления от времени испытаний практически совпадают для покрытий ИФХАНАЛ-3 и ИФХАНАЛ-3+БТА. Таким образом, введение в конвертирующий состав БТА не влияет на структуру покрытия и увеличивает его защитные свойства за счёт синергии с карбоксилатным ингибитором.

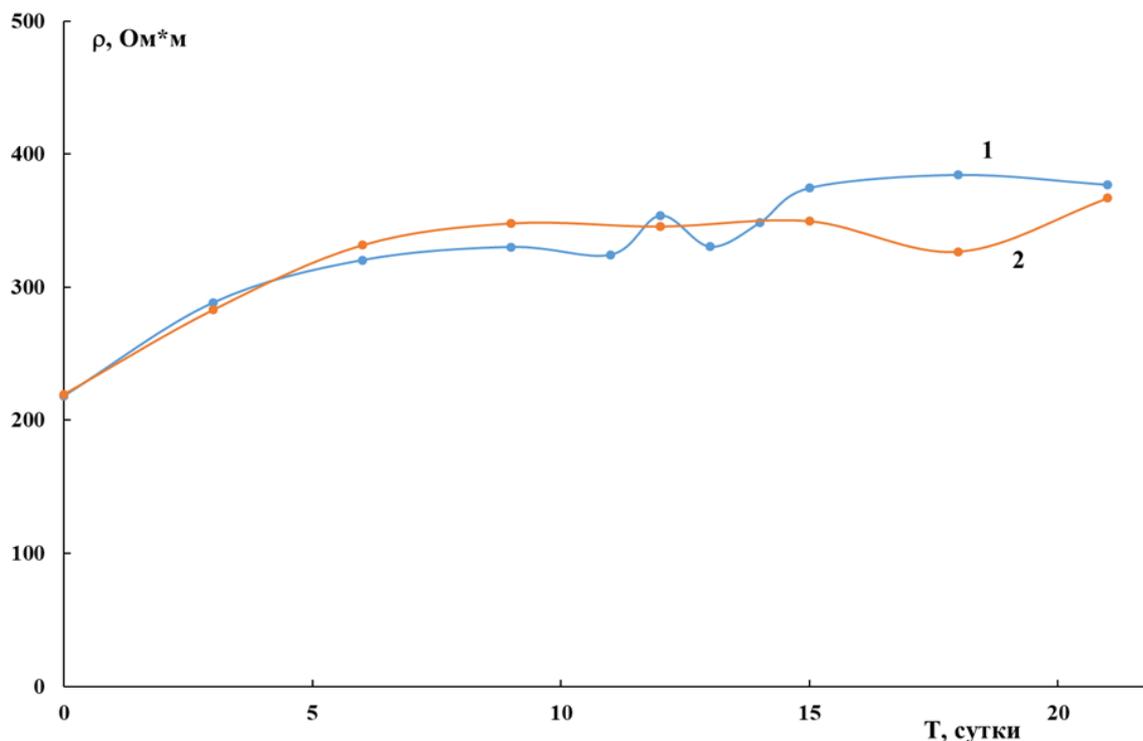


Рисунок 3. Зависимости удельного сопротивления системы «АМг3-покрытий-боратный буферный раствор (рН 1,7)–покрытие–АМг3» от времени нахождения образцов с ингибированными покрытиями в камере влажности: 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА.

Исследования полученных покрытий с помощью рентгеноспектрального микроанализа показали, что визуально ингибированное покрытие ИФХАНАЛ-3, практически, не меняется после 30 суток испытаний, а его элементный состав остаётся постоянным (рис. 4). Важно отметить неизменное количество углерода в составе покрытия с течением испытаний, что дополнительно подтверждает отсутствие десорбции ингибитора коррозии. Однако стоит отметить наличие оксидов Mg и Si в составе покрытия. По-видимому, именно присутствие в покрытии таких катодных включений способствует образованию питтингов в покрытии. При этом дополнительное ингибирование катодных участников с помощью БТА и приводит к более длительному периоду до образования первых коррозионных поражений для покрытий, полученных в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА.

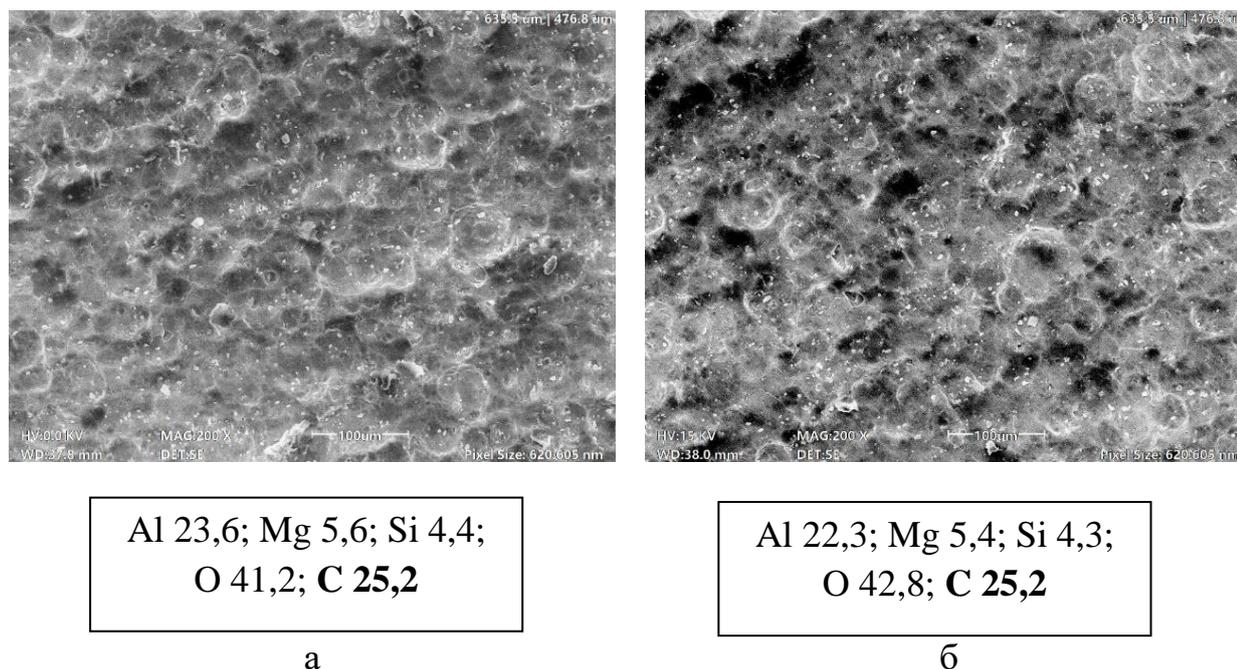


Рисунок 4. Микротофографии поверхности и элементный состав ингибированного покрытия ИФХАНАЛ-3 на алюминиевом сплаве АМг3 в исходном виде (а) и после 30 суток нахождения в камере влажности (б).

В работе [20], где методом СЭИ исследовались анодные покрытия на алюминиевых сплавах при испытаниях в камере солевого тумана, было предложено использовать изменение емкостного параметра Q_f , входящего в состав элемента постоянной фазы CPE_f , для предсказания начала коррозионного процесса:

$$D = \left| \log \frac{Q_{f(initial)}}{Q_{f(t)}} \right| \quad (2)$$

где, $Q_{f(initial)}$ – емкостной параметр элемента постоянной фазы CPE_f для исходного покрытия, $Q_{f(t)}$ – емкостной параметр элемента постоянной фазы CPE_f для покрытия после коррозионных испытаний за определённый период времени.

Согласно исследованиям авторов [20], существенное изменение параметра D в начальный период времени испытаний свидетельствует о том, что для такого покрытия коррозионные поражения появятся раньше, чем для покрытий, у которых параметр D меняется позже. На рисунке 5 представлен расчёт параметра D для конверсионных покрытий ИФХАНАЛ-3 и ИФХАНАЛ-3+БТА в течение 12 суток нахождения в камере влажности. Эти данные действительно показывают, что для покрытий ИФХАНАЛ-3 параметр D начинает расти на 5 сутки испытаний в камере влажности и увеличивается, примерно, в 3 раза на 6 сутки испытаний. Этого не происходит для покрытий, полученных в растворе ИФХАНАЛ-3+БТА. Для них значение параметра D наоборот несколько снижается в начальный период времени, а затем возвращается к исходному значению.

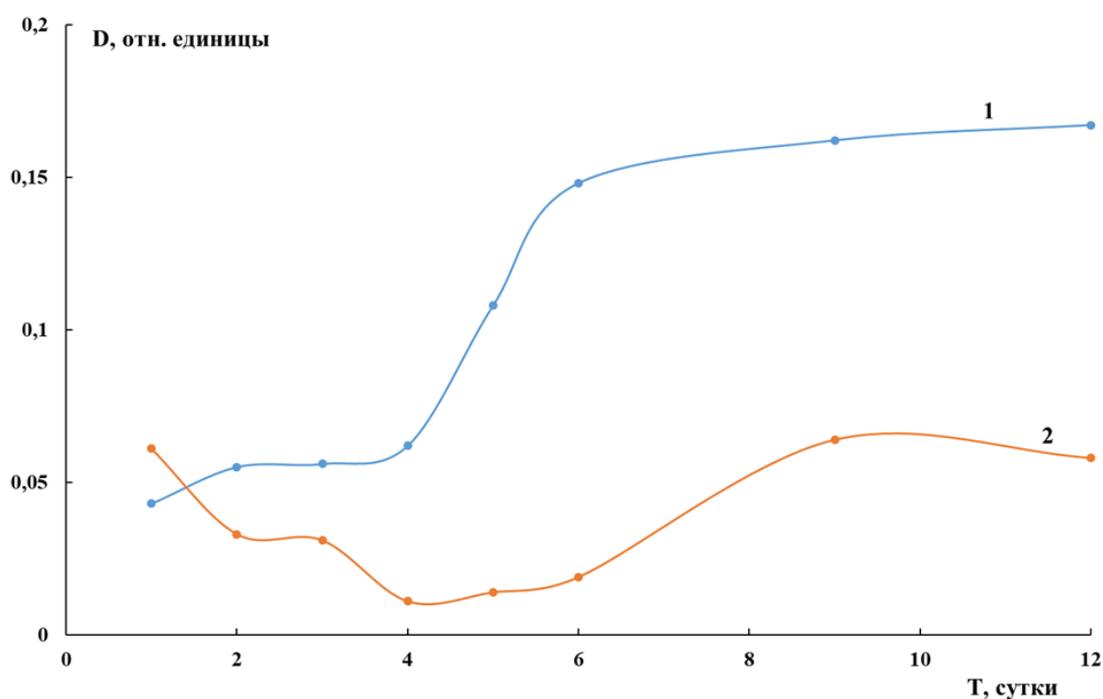


Рисунок 5. Зависимости расчётного параметра D от времени нахождения образцов с ингибированными покрытиями в камере влажности: 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА.

Таким образом, можно говорить о том, что в случае конверсионных покрытий, полученных методом химического оксидирования, расчётный параметр D может быть использован в качестве определения покрытия с меньшей коррозионной стойкостью, однако для того, чтобы вывести закономерность значения параметра D от времени до появления первых коррозионных поражений требуется провести большее количество испытаний разных покрытий на различных сплавах.

Выводы

1. Испытания ингибированных покрытий ИФХАНАЛ-3 на алюминиевом сплаве АМгЗ в камере влажности Г-4 не приводят в десорбции ингибитора коррозии из покрытий в течение всего периода испытаний, а основным фактором начала коррозионного процесса является наличие оксидов Mg и Si в составе покрытий.
2. Введение БТА в конвертирующий состав ИФХАНАЛ-3 приводит к существенному росту защитных свойств получаемых покрытий за счёт взаимодействия БТА с карбоксилатным ингибитором в процессе наполнения покрытий и ингибирования катодных участков покрытия.
3. Расчётный параметр D , который представляет собой изменение ёмкостного параметра Q_f , входящего в состав элемента постоянной фазы CPE_f , может быть использован для раннего определения покрытий с меньшей коррозионной стойкостью.

Благодарности/Финансирование

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

Список литературы

1. А.А. Михайлов, Ю.М. Панченко и Ю.И. Кузнецов, *Атмосферная коррозия и защита металлов*, Тамбов: Изд. Першина Р.В., 2016, 555 с.
2. R. Vera, D Delgado and B.M. Rosales, Effect of atmospheric pollutants on the corrosion of high power electrical conductors: Part 1. Aluminium and AA6201 alloy, *Corros. Sci.*, 2006, **48**, no. 10, 2882–2900. doi: [10.1016/j.corsci.2005.11.012](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.11.012)
3. Z. Dan, S. Takigawa, I. Muto and N. Hara, Applicability of constant dew point corrosion tests for evaluating atmospheric corrosion of aluminium alloys, *Corros. Sci.*, 2011, **53**, no. 5, 2006–2014. doi: [10.1016/j.corsci.2011.02.027](https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.02.027)
4. *Коррозия алюминия и алюминиевых сплавов*, Под ред. Джозеф Р. Дэвис. Москва. НП «Апрал», 2016, 333 с.
5. 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.
6. H. Hassannejad, M. Moghaddasi, E. Saebnoori and A.R. Baboukani, Microstructure, deposition mechanism and corrosion behavior of nanostructured cerium oxide conversion coating modified with chitosan on AA2024 aluminum alloy, *J. Alloys Compd.*, 2017, **725**, no. 25, 968–975. doi: [10.1016/j.jallcom.2017.07.253](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.253)
7. Z. Mahidashti, T. Shahrabi and B. Ramezanzadeh, A new strategy for improvement of the corrosion resistance of a green cerium conversion coating through thermal treatment procedure before and after application of epoxy coating, *Appl. Surf. Sci.*, 2016, **390**, no. 30, 623–632. doi: [10.1016/j.apsusc.2016.08.160](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.160)
8. A. Uhart, J.B. Ledeuil, D. Gonbeau, J.C. Dupin, J.P. Bonino, F. Ansart and J. Esteban, An Auger and XPS survey of cerium active corrosion protection for AA2024-T3 aluminum alloy, *Appl. Surf. Sci.*, 2016, **390**, no. 30, 751–759. doi: [10.1016/j.apsusc.2016.08.170](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.08.170)
9. G.-T. Shen, S.-Y. Chen, C.-Y. Huang and C.-S. Lin, Microstructural evolution and corrosion behavior of constituent particles of AA2024-T3 Al alloy during zirconium conversion coating, *Appl. Surf. Sci.*, 2023, **635**, no. 30 157657 doi: [10.1016/j.apsusc.2023.157657](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157657)
10. Yu.A. Kuzenkov, S.V. Oleinik, A.S. Zimina, L.P. Kazanskii, V.N. Ivonin and V.A. Karpov, Submicron free-chromate chemical conversion coatings on AMg3 aluminum alloy, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2017, **52**, no. 7, 1205–1210. doi: [10.1134/S2070205116070121](https://doi.org/10.1134/S2070205116070121)

11. Y.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)
12. D.O. Chugunov, Yu.A. Kuzenkov and S.Yu. Rybakov, Impedance spectroscopy of chromate-free conversion coatings on aluminum alloys of various alloying, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2025, **14**, no. 2, 694–705. doi: [10.17675/2305-6894-2025-14-2-14](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2025-14-2-14)
13. Yu.B. Makarychev, Yu.A. Kuzenkov, D.O. Chugunov, O.Yu. Grafov and A.D. Aliev, Vapor-phase deposition of polymer siloxane coatings on aluminum and magnesium alloys, *Prog. Org. Coat.*, 2023, **183**, 107755. doi: [10.1016/j.porgcoat.2023.107755](https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107755)
14. Д.О. Чугунов, Ю.А. Кузенков и С.Ю. Рыбаков, Модификация бесхроматных конверсионных покрытий на алюминиевом сплаве 1105 для увеличения их защитных свойств, *Коррозия: защита материалов и методы исследований*, 2025, **3**, №. 1, 73–84. doi: [10.61852/2949-3412-2025-3-1-73-84](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2025-3-1-73-84)
15. P. Ahmadi, E. Darvish, M.H. Shahini, H.E. Mohammadloo, M. Behzadnasab and R. Ghamsarizade, New hybrid organic-inorganic conversion coating applied on the Al2024 substrate: Electrochemical, adhesion and surface study, *J. Alloys Compd.*, 2025, **1010**, 177033. doi: [10.1016/j.jallcom.2024.177033](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177033)
16. Q. Boyer, M.R.O. Vega and C.F. Malfatti, S. Duluard and F. Ansart, Correlation between morphology and electrochemical behavior of chromium-free conversion coatings for aluminum alloys corrosion protection, *Surf. Coat. Technol.*, 2018, **351**, 115–127. doi: [10.1016/j.surfcoat.2018.07.068](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.07.068)
17. V López, J.A González, E Otero, E Escudero and M Morcillo, Atmospheric corrosion of bare and anodised aluminium in a wide range of environmental conditions. Part II: Electrochemical responses, *Surf. Coat. Technol.*, 2002, **153**, no. 2–3, 235–244. doi: [10.1016/S0257-8972\(01\)01681-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01681-4)
18. В.В. Антипов, И.М. Медведев, А.Е. Кутырев и И.А. Волков, Исследование изменения электрохимических свойств анодно-оксидных покрытий при натурной экспозиции в течение года, *Коррозия: Материалы, Защита*, 2021, №. 12, 22–31. doi: [10.31044/1813-7016-2021-0-12-22-32](https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-12-22-32)
19. Н.Г. Ануфриев, С.В. Олейник и Ю.А. Кузенков, Экспресс-оценка защитной способности бесхроматных конверсионных покрытий на алюминиевых сплавах АМгЗ и Д16, *Коррозия: Материалы, Защита*, 2020, №. 5, 38–46. doi: [10.31044/1813-7016-2020-0-5-38-46](https://doi.org/10.31044/1813-7016-2020-0-5-38-46)
20. В.В. Антипов, И.М. Медведев, А.Е. Кутырев и И.А. Волков, Разработка методики экспресс-оценки защитных свойств анодно-оксидных покрытий при испытаниях в КСТ, *Коррозия: Материалы, Защита*, 2021, №. 3, 42–48. doi: [10.31044/1813-7016-2021-0-3-42-48](https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-3-42-48)

Investigation of electrochemical properties of inhibited chromate-free conversion coatings on AMg3 aluminum alloy during exposure in a humidity chamber

Yu.A. Kuzenkov*, D.O. Chugunov, N.G. Anufriev and S.Yu. Rybakov

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

**Email: osvpkz@outlook.com*

Abstract

Aluminum alloys of Al-Mg system have a high corrosion resistance, but scientific researches show that they are characterized by pitting corrosion even under atmospheric conditions. Therefore, various coatings for their protection are used, including coatings obtained by chemical oxidation method. In this paper, studies of chromate-free inhibited IFKhANAL-3 conversion coatings were carried out in the G-4 humidity chamber in combination with electrochemical impedance spectroscopy, conductometric analysis and X-ray spectral microanalysis. This made it possible to identify the factors of the beginning of the corrosion process and, in particular, to show the absence of corrosion inhibitor desorption during testing. It was shown that the addition of 1,2,3-benzotriazole into the converting solution contributes to both an increase in the active resistance (R_f) of the oxide film and a later appearance of the first corrosion damage on the coating in comparison with unmodified coatings. According to the conductometric analysis data, it has been shown that a decrease in the porosity of the coatings is observed during the G-4 humidity chamber tests.

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