

УДК 620.197

Влияние температуры оксидирования на защитные свойства бесхроматных конверсионных покрытий на алюминиевом сплаве Д16

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

Аннотация

Замена токсичных хроматных составов химического оксидирования алюминиевых сплавов является актуальной задачей. Одним из способов достичь высокой эффективности бесхроматных конверсионных покрытий является изучение параметров оксидирующего состава и различных добавок к нему. В статье представлены результаты исследования влияния температуры формирования бесхроматных конверсионных покрытий на коррозионную стойкость алюминиевого сплава Д16. Изучена защитная способность покрытий, полученных при температурах 80°C и 90°C в конвертирующих растворах с и без добавления модифицирующих добавок 1,2,3-бензотриазола (БТА) и Трилон Б. С помощью поляризационных измерений, спектроскопии электрохимического импеданса и коррозионных испытаний установлено, что повышение температуры процесса способствует формированию более эффективного с точки зрения антикоррозионной защиты покрытия. Показано, что введение модификаторов позволяет усилить защитные свойства покрытий. Коррозионные испытания в термовлагокамере подтверждают защитные свойства покрытий, полученных в модифицированных составах при температуре оксидирования 90°C.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, конверсионные покрытия, химическое оксидирование, питтинговая коррозия, ингибиторы коррозии, температура оксидирования, бесхроматные технологии*

Поступила в редакцию 24.03.2026 г.; После доработки 24.03.2026 г.; Принята к публикации 24.03.2026 г.

doi: [10.61852/2949-3412-2026-4-1-69-78](https://doi.org/10.61852/2949-3412-2026-4-1-69-78)

Введение

Алюминиевые сплавы занимают одно из лидирующих позиций в современном машиностроении и авиастроении благодаря сочетанию низкой плотности, высокой удельной прочности и хорошей технологичности. Среди конструкционных материалов особого внимания заслуживает сплав Д16 (система Al–Cu–Mg), относящийся к классу дюралюминиев. Высокие механические характеристики сплава Д16, достигаемые в результате термического упрочнения

(закалка и естественное старение), делают его незаменимым при изготовлении нагруженных элементов конструкций: обшивки самолетов, силовых каркасов, деталей шасси и элементов транспортных средств [1, 2].

Однако широкое применение сплава Д16 ограничивается его низкой коррозионной стойкостью. Наличие меди в составе сплава способствует образованию локальных гальванических пар между матрицей и интерметаллидными включениями, что приводит к развитию межкристаллитной, слоистой и питтинговой коррозии, особенно во влажных и агрессивных средах [3, 4]. В связи с этим эксплуатация изделий из Д16 без надежной защитной обработки недопустима, так как коррозионные повреждения могут существенно снизить ресурс конструкции и привести к аварийным ситуациям.

Для защиты алюминиевых сплавов от коррозии применяется комплекс методов, включающий легирование, рациональное конструирование узлов, а также нанесение защитных покрытий. Традиционными способами защиты сплава Д16 являются плакирование (нанесение слоя технического алюминия), анодирование и нанесение лакокрасочных материалов [3]. Несмотря на высокую эффективность, анодирование является энергоемким процессом, а плакирование не всегда технологически применимо для сложных профилей. В этой связи распространение получили химические методы формирования конверсионных покрытий. Такие покрытия служат не только барьером для агрессивных сред, но и улучшают адгезию последующих слоев краски или грунта, обеспечивая комплексную защиту [5, 6].

В качестве экологически безопасной альтернативы конверсионным покрытиям, получаемым методом химического оксидирования, на основе токсичного шестивалентного хрома [7] исследователями предлагаются конвертирующие растворы на основе соединений церия. Однако исследователи отмечают, такие покрытия имеют склонность к растрескиванию, в связи с чем они нуждаются в дополнительной постобработке, например, в растворах фосфатов или молибдатов [8, 9]. Вместе с тем, защитные свойства конверсионных покрытий могут быть также усилены путём их обработки в растворах ингибиторов коррозии алюминия [10, 11].

В предыдущих исследованиях была оценена защитная способность бесхроматных конверсионных покрытий, сформированных на поверхности ряда алюминиевых сплавов, а также проанализировано влияние технологических факторов на их эффективность [12–17]. В продолжение данных исследований настоящая работа посвящена изучению влияния температуры конверсионной обработки сплава Д16 в растворе ИФХАНАЛ-3 и последующего наполнения покрытия ингибитором коррозии на его коррозионную стойкость.

Методика эксперимента

Конверсионные покрытия получали на плоских образцах из алюминиевого сплава Д16 (20×100 мм). Состав сплава приведён в таблице 1.

Образцы шлифовали наждачной бумагой разной зернистости, обезжировали 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 конвертирующий раствор на 50 мин. Покрытия формировали в конвертирующем составе ИФХАНАЛ-3 (на основе боратов) при температурах 80–90°C и pH 12 без и с добавлением модифицирующих добавок – 1,2,3-бензотриазол (БТА) и Трилон Б. После оксидирования образцы вынимали из раствора, промывали дистиллированной водой, сушили на воздухе при комнатной температуре не менее 12 ч и взвешивали.

Таблица 1. Содержание легирующих элементов в сплаве Д16 по ГОСТ 4784-97.

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

*остальное Al

Толщину покрытий оценивали по потере 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 (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; ρ – плотность покрытия, г/см³; $S_{\text{обр}}$ – площадь покрытия на образце, см².

После оксидирования покрытия наполняли при погружении образцов на 1 ч в горячую дистиллированную воду (98–100°C) с ингибитором коррозии (на основе карбоксилатов).

Анодные поляризационные кривые на электродах из сплава Д16 с покрытиями (рабочая поверхность 0,5 см²) снимали в боратном буферном растворе (pH 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.

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 (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 схему Мансфельда, представленную 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.

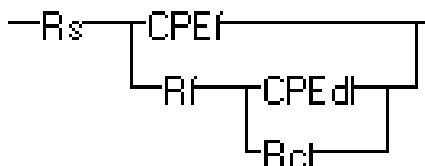


Рисунок 1. Электрическая эквивалентная схема Мансфельда (ЭЭС)

Коррозионные испытания конверсионных покрытий по ГОСТ 9.913–90 в камере влажности Г-4 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.

Результаты

Анодные поляризационные кривые, снимаемые в хлоридсодержащем растворе, позволяют оценить электрохимическую стойкость исследуемых покрытий. Для всех образцов с конверсионными покрытиями наблюдается выраженная область пассивации, характеризующаяся низким значением плотности анодного тока в широком диапазоне потенциалов. При этом покрытия, сформированные при 90°C , демонстрируют более положительное значение потенциала коррозии ($E_{\text{кор}}$) – его значение сдвигается на 40–80 мВ в анодную область. Также наблюдается снижение плотности тока пассивации ($i_{\text{пасс}}$) по сравнению с покрытиями, полученными при 80°C (рисунок 2б).

Введение модифицирующих добавок приводит к дополнительному улучшению электрохимических характеристик. Наибольший эффект наблюдается для композиции ИФХАНАЛ-3+Трилон Б: у данного состава значение $i_{\text{пасс}} \approx 1,2 \text{ мкА/см}^2$ (при 90°C) является минимальным, что в 3,5 раза ниже, чем для немодифицированного покрытия. Это может быть связано с тем, что комплексоны, находящиеся в конвертирующем растворе, способны блокировать активные центры коррозионного поражения – границы зёрен и области межфазных границ, где локализуется электрохимическое растворение алюминия. БТА также демонстрирует ингибирующее действие, однако его эффективность несколько ниже: $i_{\text{пасс}}$ для состава ИФХАНАЛ-3+БТА составляет $\approx 2,1 \text{ мкА/см}^2$. Вероятно, это обусловлено различием в механизмах адсорбции: БТА преимущественно взаимодействует с медьсодержащими фазами, тогда как Трилон Б оказывает более универсальное действие, образуя комплексы с широким спектром катионов и способствуя гомогенизации поверхности покрытия. Стоит также отметить что повышение температуры, равно, как и добавление к конверсионному составу БТА и Трилон Б способствует значительному смещению потенциала питтингообразования ($E_{\text{пт}}$) в положительную область относительно покрытий, полученных при 80°C – на 200–500 мВ.

Можно предположить, что повышение температуры окислирования

приводит к росту толщины покрытий и тем самым увеличивая количество адсорбируемого ингибитора коррозии. Однако это отчасти верно только для немодифицированного покрытия. Повышение температуры оксидирования до 90°C приводит к увеличению его толщины на 36,3%, что согласуется с общими закономерностями термоактивируемых процессов формирования оксидных плёнок. В случае же покрытий, модифицированных БТА и Трилоном Б, толщина покрытия растёт не более, чем на 10%, при увеличении температуры оксидирования до 90°C (таблица 2). Как видно из рисунка 2а, защитные свойства таких покрытий без наполнения в растворе ингибитора коррозии, примерно, одинаковы, как в случае температуры оксидирования 90°C, так и в случае 80°C. Немодифицированное покрытие, наоборот, демонстрирует увеличение защитных свойств за счёт роста толщины покрытия. Таким образом, повышение температуры оксидирования в большей степени влияет на формирование оксидной плёнки с большей адсорбционной способностью.

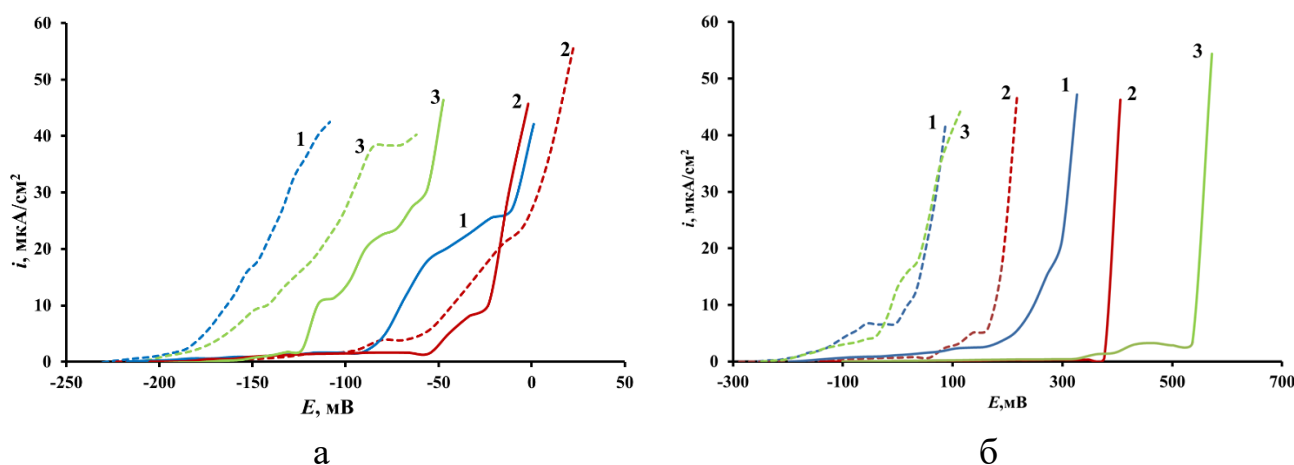


Рисунок 2. Анодные поляризационные кривые сплава Д16 в боратном буферном растворе, содержащем 0,01М NaCl (рН 7,4), с покрытиями, полученными при температуре оксидирования 80°C (---) и 90°C (—) в исходном виде (а) и после наполнения в растворе ингибитора коррозии (б): 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА, 3 – ИФХАНАЛ-3+Трилон Б

Таблица 2. Толщины конверсионных покрытий на сплаве Д16 в зависимости от температуры оксидирования.

Температура, °С	Толщина покрытий, мкм		
	ИФХАНАЛ-3	ИФХАНАЛ-3+БТА	ИФХАНАЛ-3+Трилон Б
80	2,7±0,1	3,4±0,1	3,1±0,1
90	3,7±0,1	3,7±0,1	3,3±0,1

Помимо температуры оксидирования на толщину покрытий влияет и введение модифицирующих добавок в конвертирующий состав. Так добавки БТА приводят к увеличению толщины плёнки на 24%, Трилона Б – на 15,6%. Это эффект, вероятно, может быть объяснен адсорбционным взаимодействием органических молекул с активными центрами на поверхности алюминиевого

сплава. БТА, являясь гетероциклическим соединением, способен образовывать хелатные комплексы с ионами меди, входящей в состав сплава Д16 ($\text{Cu} \sim 3,8\text{--}4,9\%$), тем самым замедляя локальное растворение интерметаллидных фаз типа Al_2CuMg и способствуя более равномерному росту оксидного слоя. Трилон Б проявляет несколько иной механизм действия: за счёт наличия четырёх карбоксильных групп и двух атомов азота он эффективно связывает катионы поливалентных металлов (Al^{3+} , Cu^{2+} , Mg^{2+}), регулируя скорость их перехода в раствор и, как следствие, кинетику формирования покрытий. При этом меньший прирост толщины по сравнению с БТА может указывать на то, что Трилон Б преимущественно влияет на плотность и дефектность структуры покрытия, а не на скорость его роста.

Это можно подтвердить с помощью метода импедансной спектроскопии. Диаграммы Найквиста (рисунок 3), полученные в диапазоне частот 60 кГц–0,1 Гц, характеризуются наличием одной выраженной высокочастотной полудуги, что типично для систем с одним доминирующим процессом переноса заряда на границе «покрытие–электролит». Результаты расчёта по схеме Мансфельда показывают, что увеличение защитной способности модифицированных покрытий обусловлено преимущественно ростом R_f (сопротивления самой плёнки) и R_{ct} (сопротивления электрохимической реакции на границе с металлом). При этом параметр n элемента постоянной фазы CPE_f , характеризующий степень идеальности ёмкостного поведения, возрастает с 0,63 для исходного покрытия до 0,72 для состава с БТА и 0,74 для Трилона Б, что указывает на снижение шероховатости и дефектности поверхности.

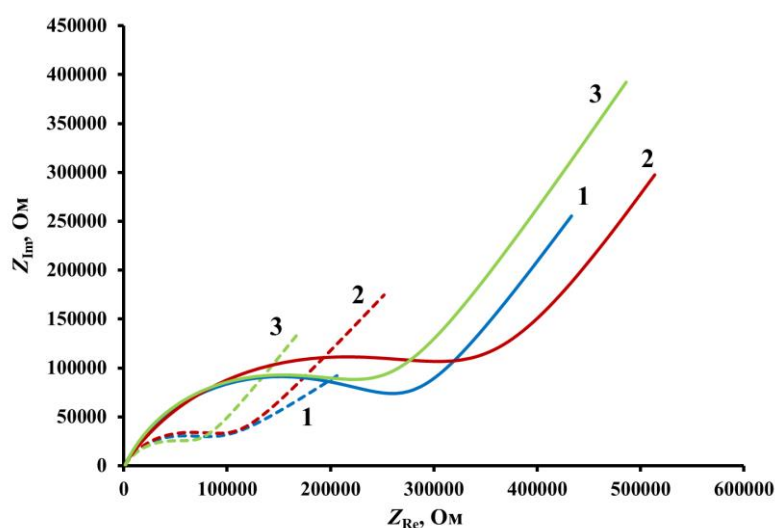


Рисунок 3. Диаграммы Найквиста сплава Д16 в боратном буферном растворе (рН 7,4) с покрытиями, полученными при температуре оксидирования 80°C (– –) и 90°C (—): 1 – ИФХАНАЛ-3, 2 – ИФХАНАЛ-3+БТА, 3 – ИФХАНАЛ-3+Трилон Б. Все покрытия были наполнены в растворе ингибитора коррозии.

Коррозионные испытания в камере влажности Г-4 позволили получить качественную оценку долговечности покрытий в условиях конденсирующейся влаги, моделирующих атмосферную коррозию. Анализ представленных данных

(таблица 3) выявляет несколько ключевых закономерностей, характеризующих влияние параметров обработки на коррозионную стойкость покрытий. Прежде всего, стоит отметить выраженный температурный эффект: повышение температуры формирования покрытия с 80 до 90°C увеличивает время до появления первых питтингов для всех исследованных составов. Это подтверждает данные поляризационных исследований и то, что покрытия, полученные при 90°C, обладают более высокими адсорбционными свойствами. Помимо этого, добавки БТА и Трилона Б демонстрируют положительное влияние на защитные свойства покрытий при обеих температурах оксидирования: при 80°C введение БТА и Трилона Б способствует увеличению времени до появления первых питтингов на 50 и 75% соответственно, тогда как при 90°C относительный эффект модифицирующих добавок несколько снижается (до 20 и 60%). Это может быть обусловлено тем, что при температуре оксидирования 90°C отсутствует прирост толщины покрытий от введения БТА и Трилона Б, вследствие чего дополнительный вклад добавок проявляется в меньшей степени. При этом систематически более высокая эффективность Трилона Б по сравнению с БТА может быть объяснена различием в механизмах их действия: если БТА преимущественно адсорбируется на медьсодержащих интерметаллидных включениях, подавляя катодные процессы восстановления кислорода, то Трилон Б, обладая более высокой комплексообразующей способностью и полидентатностью, способен взаимодействовать с широким спектром поверхностных центров, способствуя «запечатыванию» микродефектов и формированию более гомогенной и плотной структуры конверсионного слоя.

Таблица 3. Результаты коррозионных испытаний покрытий на сплаве Д16 в камере влажности Г-4. Все покрытия были наполнены в растворе ингибитора коррозии.

Конверсионное покрытие	Температура оксидирования, °С	Время до появления первых питтингов, сут
ИФХАНАЛ-3	80	4
ИФХАНАЛ-3+БТА	80	6
ИФХАНАЛ-3+Трилон Б	80	7
ИФХАНАЛ-3	90	10
ИФХАНАЛ-3+БТА	90	12
ИФХАНАЛ-3+Трилон Б	90	16

Выводы

1. Установлено, что температура формирования конверсионных покрытий является важным параметром, влияющим на его толщину и адсорбционные свойства. Показано, что повышение температуры оксидирования с 80 до 90°C способствует формированию покрытий с более высокими адсорбционными свойствами.
2. Введение в конвертирующий раствор модифицирующих добавок

(БТА, Трилон Б) улучшает электрохимические характеристики получаемых конверсионных покрытий, причём наибольший эффект достигается при использовании Трилона Б благодаря его комплексообразующей способности и снижению дефектности образующихся покрытий.

3. Модифицированное конверсионное покрытие ИФХАНАЛ-3+Трилон Б, сформированное при 90°C, с последующим наполнением в растворе ингибитора коррозии обеспечивает коррозионную стойкость сплава Д16 до 16 суток в условиях камеры влажности Г-4, что в 4 раза выше, чем для немодифицированного покрытия, полученного при температуре 80°C.

Благодарность/Финансирование

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

Список литературы

1. А.И. Беляев, О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов, Н.И. Колобнев, А.А. Колпачев, Л.А. Костюков, К.С. Походаев, О.Г. Сенаторова, Р.Р. Романова, Е.А. Ткаченко и И.Н. Фридляндер, *Металловедение алюминия и его сплавов*, М.: Металлургия, 1983, 280 с.
2. ГОСТ 4784-2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки
3. В.С. Синявский, В.Д. Вальков, В.Д. Калинин, *Коррозия и защита алюминиевых сплавов*, М.: Металлургия, 1986, 368 с.
- 4 *Коррозия алюминия и алюминиевых сплавов*. Под ред. Джозефа Р. Дейвиса. М.: НП «АПРАЛ», 2016, С. 333.
5. Y.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)
6. 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)
7. 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.
8. H. Zhang and Y. Zuo, The improvement of corrosion resistance of Ce conversion films on aluminum alloy by phosphate post-treatment, *Appl. Surf. Sci.*, 2008, **254**, no. 16, 4930–4935. doi: [10.1016/j.apsusc.2007.12.066](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.12.066)
9. B.F. Rivera, B.Y. Johnson, M.J. O'Keefe and W.G. Fahrenholtz, Deposition and characterization of cerium oxide conversion coatings on aluminum alloy 7075-T6, *Surf. Coat. Technol.*, 2004, **176**, no. 3, 349–356. doi: [10.1016/S0257-8972\(03\)00742-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(03)00742-4)

10. Yu.I. Kuznetsov, Organic corrosion inhibitors: where are we now? A review. Part II. Passivation and the role of chemical structure of carboxylates, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2016, **5**, no. 4, 282–318. doi: [10.17675/2305-6894-2016-5-4-1](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2016-5-4-1)
11. A.M. Semiletov, A.A. Kudelina, E.S. Khudoleeva and Yu.I. Kuznetsov, Surface modification of aluminum alloy AMg6 by ethanol solutions of alkyl phosphates, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2024, **13**, no. 2, 1292–1303. doi: [10.17675/2305-6894-2024-13-2-34](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-34)
12. Ю.А. Кузенков, С.В. Олейник и А.С. Корякин, Модифицирование бесхроматного конвертирующего состава ИФХАНАЛ-3 для получения покрытий на алюминиевом сплаве В95Т2, *Коррозия: материалы и защита*, 2016, №9, с. 34–39
13. Корякин А.С., Кузенков Ю.А., Олейник С.В., Защитные бесхроматные конверсионные покрытия на алюминиевом сплаве 1441, *Коррозия: материалы, защита*, 2018, №1, 35–40.
14. 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)
15. 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)
16. D.O. Chugunov, Yu.A. Kuzenkov and S.Yu. Rybakov, Modification of chromate-free conversion coatings on 1105 aluminum alloy to increase their protective properties, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2024, **13**, no. 4, 2255–2265. Doi: [10.17675/2305-6894-2024-13-4-18](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-4-18)
17. D.O. Chugunov, Yu.A. Kuzenkov and S.Yu. Rybakov, Inhibited chromate-free conversion coatings for AMg5 aluminum alloy, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2023, **12**, no. 4, 2092–2100. doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-4-35](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-35)

The effect of oxidation temperature on the protective properties of chromate-free conversion coatings on D16 aluminum alloy

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

*Email: osvpkz@outlook.com

Abstract

The replacement of toxic chromate compounds of chemical oxidation of aluminum alloys is an urgent task. One of the ways to achieve high efficiency of chromate-free conversion coatings is to study the parameters of the oxidizing composition and various additives to it. This article presents the results of a study investigating the effect of treatment temperature on the corrosion resistance of chromate-free conversion coatings formed on D16 aluminum alloy (Russian analogue of AA2024 alloy). The protective properties of coatings obtained at 80°C and 90°C in conversion solutions, with and without the addition of modifying additives 1,2,3-benzotriazole and EDTA-Na₂, was evaluated. Through polarization measurements, electrochemical impedance spectroscopy, and corrosion testing, it was determined that increasing the treatment temperature promotes the formation of a coating with superior anticorrosion protection. The introduction of modifiers was found to enhance the protective properties of the coatings. Corrosion tests conducted in a climatic chamber confirm the effectiveness of coatings obtained at 90°C.

Keywords: *aluminum alloys, conversion coating, chemical oxidation, pitting corrosion, corrosion inhibitors, chromate-free technologies, oxidation temperature*