

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-9-17

С.А. Каримова¹, А.Е. Кутырев¹, Т.Г. Павловская¹, К.Е. Захаров¹**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ УПЛОТНЕНИЕ АНОДНО-ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Исследована технология уплотнения защитных неметаллических неорганических сернокислотных анодно-оксидных покрытий на алюминиевых и алюминийлитиевых сплавах при пониженной температуре в растворах, содержащих ингибиторы коррозии алюминия с улучшенными экологическими характеристиками.

Разработан состав раствора, позволяющий снизить обычно применяемую температуру уплотнения более чем в 2 раза.

Для определения защитных свойств уплотненного по разработанной технологии покрытия кроме стандартных методов (проба «по капле», коррозионные испытания в КСТ) использованы электрохимические методы анодной поляризации и импедансной спектроскопии.

Ключевые слова: анодное оксидирование, анодно-оксидные покрытия, уплотнение, ингибиторы, алюминиевые и алюминийлитиевые сплавы.

A seal technology of protective non-metallic inorganic sulfuric acid anodic-oxide coatings of aluminum and aluminum-lithium alloys at low temperature in solutions containing aluminum corrosion inhibitors with improved environmental characteristics was studied.

A mixture of the solution, allowing to decrease a typical seal temperature more, than 2 times was developed.

To determine protective characteristics of the sealed against this technology coating in addition to the standard methods (test «drop by drop», corrosion spray tests in SFC) electrochemical methods of anode polarization and impedance spectroscopy were used.

Keywords: anode oxidation, anodic-oxide coatings, sealing, inhibitors, aluminum and aluminum-lithium alloys.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

При создании конструкций из новых материалов необходима разработка экологически безопасных энергосберегающих технологий, позволяющих защитить конструкции от воздействия внешних факторов природного и искусственного происхождения для повышения безопасности и долговечности – в 1,5–2 раза [1, 2].

С целью защиты от коррозии деталей и изделий различного назначения (от бытовой техники до космических аппаратов [3, 4]), изготавливаемых из алюминиевых сплавов, используются неметаллические неорганические анодно-оксидные покрытия, формирующиеся электрохимическим способом [5]. Различные способы получения анодно-оксидных покрытий в электролитах, содержащих растворы органических и неорганических кислот, разрабатывали в течение всего XX века [6].

Анодно-оксидные покрытия – в связи с их структурными особенностями – относятся к наноразмерным пленочным материалам [7].

В отечественной промышленности наиболее широко распространен сернокислотный метод анодного оксидирования, отличающийся относительной простотой и дешевизной, в электролите, содержащем серную кислоту [8].

Сернокислотное анодно-оксидное покрытие

состоит из двух слоев: тонкого беспористого слоя и относительно толстого пористого слоя. Толщина беспористого слоя колеблется в пределах от 0,014 до 0,05 мкм, толщина пористого слоя – от 1 до 100 мкм [9].

Для защиты от коррозии алюминиевых сплавов используются анодно-оксидные покрытия толщиной 6–12 мкм. Объемная пористость анодно-оксидных покрытий, как показали проведенные исследования, зависит от состава сплава (табл. 1) и может составлять >60%.

Для придания высоких защитных свойств используют уплотнение инертным веществом или растворами, содержащими ингибиторы коррозии.

Ингибиторами, или замедлителями коррозии, являются химические соединения, которые даже в относительно небольших количествах могут значительно уменьшать скорость коррозионного процесса [10]. Большинство исследователей считает, что вещество может проявить ингибирующее действие, если оно способно адсорбироваться на корродирующей поверхности даже в количествах, образующих десятые и сотые доли мономолекулярного слоя [11].

Оценку эффективности уплотнения характеризуют защитные свойства покрытия, которые оценивают по результатам коррозионных испытаний

Таблица 1

Пористость неуплотненных и уплотненных анодно-оксидных покрытий

Сплав	Объемная пористость, %, покрытия	
	без уплотнения	с уплотнением ($K_2Cr_2O_7$)
В95п.ч.-Т2	44	19
1424-ТГ1	40	15
В-1469-Т1	66	27
1933-Т2	35	23

в камерах (ГОСТ 9.308–85), в натуральных условиях и электрохимическими методами.

В основе электрохимических методов лежит определение электрических параметров системы «исследуемый электрод/раствор электролита /вспомогательный электрод». При применении традиционных электрохимических методов определяют значения плотности токов (потенциалов) при поляризации исследуемых образцов в потенциостатическом либо гальваностатическом режимах.

В последнее время наибольшее распространение получил метод импедансной спектроскопии [12–14]. При использовании этого метода определяют полное сопротивление системы «металлический материал/покрытие» при наложении переменного тока различной частоты – обычно от 0,1 Гц до 1 МГц.

Оптимальные защитные свойства покрытий достигаются при использовании для уплотнения свободно адсорбирующегося в порах пленки 5%-ного раствора бихромата калия, являющегося эффективным ингибитором коррозии алюминия.

Основным недостатком растворов для уплотнения анодно-оксидных покрытий алюминиевых сплавов, содержащих соединения шестивалентного хрома, является экологическая опасность (1-й класс опасности по ГОСТ 12.1.007–76), в связи с чем необходимо использование специальных очистных сооружений и усиленной вентиляции в цехах нанесения покрытий.

Для улучшения экологических показателей процесса анодного оксидирования необходима разработка новых растворов для уплотнения анодно-оксидного покрытия, не содержащих ионов шестивалентного хрома и позволяющих снизить температуру процесса.

Материалы и методы

Анодно-оксидные покрытия формировали в электролите, содержащем 200 г/л серной кислоты, в течение 30 мин при плотности анодного тока 1 А/дм² [15]. Уплотнение проводили непосредственно после анодного оксидирования в лабораторной ванне в растворах, содержащих ингибиторы коррозии алюминия и ПАВ (без перемешивания раствора), при температуре 95–98; 38–42 и 25°C (табл. 2).

Анодное оксидирование проводили на образцах из высокопрочного алюминиевого сплава В95п.ч.-Т1, свариваемого алюминиевого сплава 1933-Т2 [16, 17], алюминийлитиевых сплавов тре-

тьего поколения: сплав средней прочности 1424-ТГ1 и высокопрочный сплав В-1469-Т1 [18].

Подготовку поверхности образцов перед анодным оксидированием проводили путем травления в 5%-ном растворе едкого натра при температуре 50–55°C в течение 2 мин с последующим осветлением в 30%-ном растворе азотной кислоты в течение 3 мин.

Образцы из сплавов, содержащих литий (1424-ТГ1, В-1469-Т1), перед травлением обрабатывали в 30%-ном растворе азотной кислоты в течение 20 мин.

Качество покрытий оценивали путем определения толщины на приборе MiniTest 2100, пористости – гравиметрическим методом.

Защитные свойства покрытий оценивали по результатам сравнительных коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ) при распылении 5%-ного раствора NaCl при температуре 35°C и относительной влажности 95–98% [19] и электрохимическими методами.

Электрохимическое изучение покрытий проводили с использованием потенциостата SI 1287 и частотного анализатора SI-1260 производства компании Solartron Analytical. Образцы помещали в ячейку специальной конструкции, позволяющей исследовать участок поверхности размером 1 см² без нанесения изолирующего слоя. Для измерения импеданса использовали электрохимическую ячейку, позволяющую исследовать образцы с большей площадью: 35 см². Управление потенциостатом (гальваностатом) производили с использованием персонального компьютера (программа «CorrWare», версия 3с).

Использовали вспомогательный электрод в виде платиновой сетки, в качестве электрода сравнения – хлорсеребряный электрод, погруженный в насыщенный раствор KCl. Значение потенциала данного электрода сравнения относительно нормального водородного электрода составляет 0,201 В. Электрод сравнения оснащен капилляром Луггина. При электрохимических исследованиях капилляр Луггина подвели непосредственно к центру рабочей (непокрытой лаком) части образца (не более 2 мм) с целью уменьшения омической составляющей iR .

Исследования проводили в стандартном (ГОСТ 9.912) электролите: 0,5 моль/дм³ NaCl (3%-ный раствор хлорида натрия), поскольку хлорид-ионы способствуют протеканию коррозионных процессов на алюминиевых сплавах. Элек-

Таблица 2

Коррозионная активность ингибиторов

Состав раствора уплотнения	Продолжительность экспозиции в КСТ, сут	Состояние поверхности после экспозиции в КСТ
В исходном состоянии (без уплотнения)	48	Множественные язвы, питтинг (30–35 шт./дм ²)
Таннин	240	Питтинг (15–20 шт./дм ²)
Катопин	120	Множественный питтинг
Уксуснокислый никель	600	Питтинг (5–10 шт./дм ²)
Синтанол	168	Множественный питтинг
Бензотриазол (БТА)	600	Мелкий питтинг (5–10 шт./дм ²)
Хромат циклогексиламина (ХЦА)	750	Мелкий питтинг (3–5 шт./дм ²)
БТА+ХЦА	750	Без изменений

тролит готовили на деионизированной воде, перед проведением экспериментов ячейку и электроды промывали водопроводной водой, затем ополаскивали два раза деионизированной водой.

Для изучения электрохимического поведения алюминиевых образцов с разработанным анодно-оксидным покрытием использовали метод анодной поляризации. Развертку потенциала осуществляли со скоростью 1 мВ/с. Измерение импеданса покрытия проводили при частотах от 10 кГц до 0,1 Гц, накладывая переменный ток так, чтобы величина потенциала образца отклонялась на 100 мВ.

Перед поляризацией образец выдерживали в течение 1 ч в растворе, измеряя его потенциал коррозии. В случае, если величина потенциала коррозии изменялась за 30 мин более чем на 50 мВ, продолжительность выдержки образца в растворе до поляризации увеличивали.

Результаты

Для разработки раствора, использование которого позволит снизить температуру процесса уплотнения, образцы из плакированного сплава Д16 погружали в 5%-ный раствор хлористого натрия с добавками тиурана, бензоата натрия, финилтиомочевины, азотистокислого натрия, катапина, таннина, хромата циклогексиламина (ХЦА), бензотриазола (БТА), уксуснокислого никеля в количестве 0,1–1 г/л.

Оценка коррозионного состояния образцов после испытаний позволила выбрать вещества, замедляющие коррозионные процессы, для проведения последующего уплотнения (см. табл. 2).

Как показали результаты сравнительных ускоренных коррозионных испытаний, при уплотнении в всех выбранных растворах защитные свойства анодно-оксидных покрытий улучшаются.

Наиболее высокие защитные свойства имеют покрытия, уплотненные в растворах, содержащих ХЦА, и в растворе, содержащем БТА. При этом по защитному действию ингибитор ХЦА превосходит ингибитор БТА. При уплотнении анодно-оксидных покрытий в растворах, содержащих БТА+ХЦА, ингибирующие свойства усиливаются,

и при экспозиции в КСТ в течение 30 сут коррозионные поражения на образцах отсутствуют.

В серийном производстве в условиях цеха необходима оценка наличия покрытия и его качества экспресс-методом, который может быть проведен только на покрытии, имеющем окраску. Неуплотненное сернокислотное анодно-оксидное покрытие практически бесцветно.

При серийном уплотнении в растворе бихромата калия анодно-оксидные покрытия приобретают желто-зеленую окраску, при этом выявляются не только дефекты покрытия (сплошность, неравномерность), но и дефекты сплава (трещины, закаты, поры и др.).

Проведен выбор красителя, который может вводиться в раствор уплотнения, при этом не происходит ухудшения качества покрытия, а само покрытие окрашивается.

Сернокислотные анодно-оксидные покрытия уплотняли в растворах, содержащих 1 г/л таких красителей, как: активный красный, активный оранжевый, кислотный красный, хромовый зеленый антрохиноновый, хромовый красный ализаринный, прямой бирюзовый, активный черный, ремазоль ярко-синий R srez, кислотный синий 2К, золотисто-желтый, золотисто-коричневый, гранат, найлозан желтый, сандолан Е-ВN, найлозан Е-2R 300. Как показали сравнительные испытания в камере влажности, при температуре 40°C все исследованные красители, кроме марки ремазоль ярко-синий R srez, оказали (по сравнению с уплотнением в воде) отрицательное влияние на защитные свойства покрытия. Эффективность использования красителя марки ремазоль ярко-синий R srez подтвердило яркое окрашивание микротрещины, возникшей при усталостных испытаниях образца из алюминиевого сплава [20] после уплотнения анодно-оксидного покрытия.

Результаты ускоренных коррозионных испытаний в КСТ показали высокие защитные свойства покрытия, уплотненного в растворе, содержащем выбранные ингибиторы, краситель и добавку ПАВ [21], при температуре 38–42°C. После экспозиции в течение 750 ч коррозионные поражения отсутствуют.

Для характеристики защитных свойств анодно-оксидного покрытия, уплотненного по разработанному режиму, также проведены электрохимические исследования. По величине потенциала коррозии алюминиевого сплава с анодно-оксидным покрытием – и особенно по результатам сравнения его с потенциалом коррозии металлического материала без покрытия – получена информация относительно структуры покрытия.

Поскольку потенциал образца с анодно-оксидным покрытием смещен в отрицательную область относительно потенциала образца без покрытия, то это позволяет предположить, что в структуре покрытия существуют участки с высокой электронной проводимостью. Данные по изменению потенциала коррозии от продолжительности выдержки для системы «алюминиевый сплав/покрытие (уплотненное по разработанной технологии)/3%-ный раствор NaCl» в сравнении с системой «алюминиевый сплав/3%-ный раствор NaCl» представлены на рис. 1. Потенциал коррозии образца с покрытием смещен в отрицательную область на ~100 мВ.

Съемку анодных поляризационных кривых проводили в катодной области – на 50 мВ отрицательнее значений потенциала коррозии. Результаты для образцов из алюминиевого сплава с покрытием и без покрытия представлены на рис. 1, б. Образец с покрытием имеет гораздо большую поляризуемость, вызванную сильным торможением анодного процесса, характеризующим защитные свойства покрытия.

Полученная поляризационная кривая свидетельствует о достаточно высоких защитных свойствах покрытия, уплотненного по разработанному режиму, так как если для сравнения взять величину потенциала, при котором на образце без покрытия достигается величина анодного тока, равного 10^{-2} А/см², то скорость анодного процесса на образце с покрытием на четыре порядка меньше, чем для образца без покрытия.

Результаты, полученные при исследовании методом импедансной спектроскопии, представляют в двух видах:

– диаграммы Найквиста (называемой также годографом), представляющей собой зависимость действительной части импеданса Z' (активное сопротивление) от его мнимой части Z'' (реактивное сопротивление);

– диаграммы Боде, представляющей собой зависимость модуля импеданса (амплитуды) и фазового угла θ от частоты.

Результаты исследования образцов с покрытием в виде диаграмм Найквиста и Боде показаны на рис. 2. Видно, что полученные данные для различных образцов обладают хорошей сходимостью. Различие наблюдается при высоких частотах (см. рис. 2, б).

Проведены сравнительные коррозионные испытания образцов из сплавов В95п.ч.-Т2,

1424-ТГ1, В-1469-Т1, 1933-Т2 с анодно-оксидным покрытием (рис. 3), уплотненным по разработанному режиму: в растворе, содержащем оптимальную концентрацию компонентов, при температуре 38–42°C в течение 20 мин. Более подробная информация о защитных свойствах покрытия, уплотненного по разработанному режиму, получена из данных импедансной спектроскопии.

Рассмотрим характер полученных данных импедансной спектроскопии в области высоких частот. Как показано на рис. 2, б, полученные данные для различных образцов с одним и тем же покрытием заметно отличаются при высоких частотах (10^4 – 10^6 Гц). Кроме того, anomalous поведение системы «сплав/анодно-оксидное покрытие/электролит» в области высоких частот хорошо наблюдается также на диаграмме Найквиста (рис. 4). Значения импеданса, относящиеся непосредственно к защитному анодно-оксидному покрытию, должны были бы находиться на кривой АВ (поскольку при импедансном исследовании применялся раствор 3%-ного NaCl, обладающий высокой проводимостью, то при высокой частоте значение импеданса должно стремиться к нулю).

Причиной этого может быть получение при высоких частотах откликов процессов, происходящих на поверхности раздела «анодно-оксидное покрытие/электролит». Это могут быть процессы адсорбции или доокисления различных примесей, присутствующих как в электролите, так и на поверхности покрытия. Другой вариант – это наличие помех при больших частотах, вызванных техническими устройствами [21]. Поскольку данные процессы не влияют на защитные свойства анодно-оксидных покрытий, то в данной работе ими можно пренебречь. Вследствие этого моделирование электрохимических процессов необходимо проводить, начиная с частоты 10^4 Гц и ниже.

С учетом механизма получения и уплотнения анодно-оксидного покрытия, а также по результатам электрохимических исследований системы «сплав/анодно-оксидное покрытие/электролит (раствор 3%-ного NaCl)» предложена эквивалентная схема, представленная на рис. 5. Данная схема предложена для лакокрасочных систем покрытий Ф. Мансфилдом [12] и применяется в том числе для моделирования различных оксидных покрытий на алюминии [23].

При высоких значениях сопротивления покрытия и низких значениях сопротивления в порах: $R_2 > R_3$, $C_2 < C_3$, последним элементом можно пренебречь. Тогда на диаграмме Боде зависимость модуля импеданса при низких частотах будет постоянной, а на диаграмме Найквиста кривая будет представлять собой полуокружность.

Однако исследуемые покрытия являются ингибированными, и при низких частотах становится заметен вклад торможения непосредственно электрохимического процесса. Вследствие этого на диаграмме Боде (рис. 6, а) модуль импеданса бу-

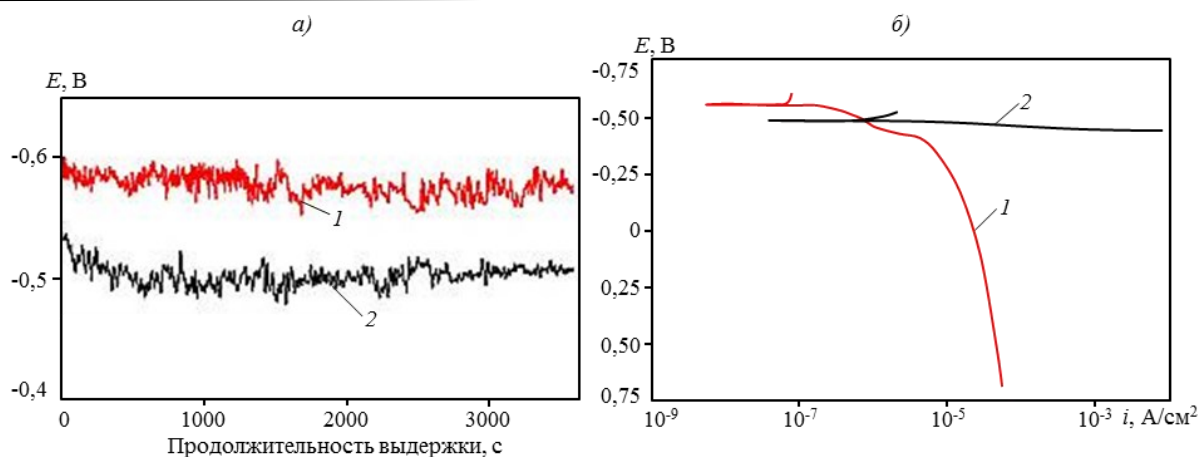


Рис. 1. Изменение потенциала во времени (а) и анодные поляризационные кривые (б) для алюминиевых образцов с разрабатываемым покрытием (1) и без покрытия (2) в 3%-ном растворе NaCl

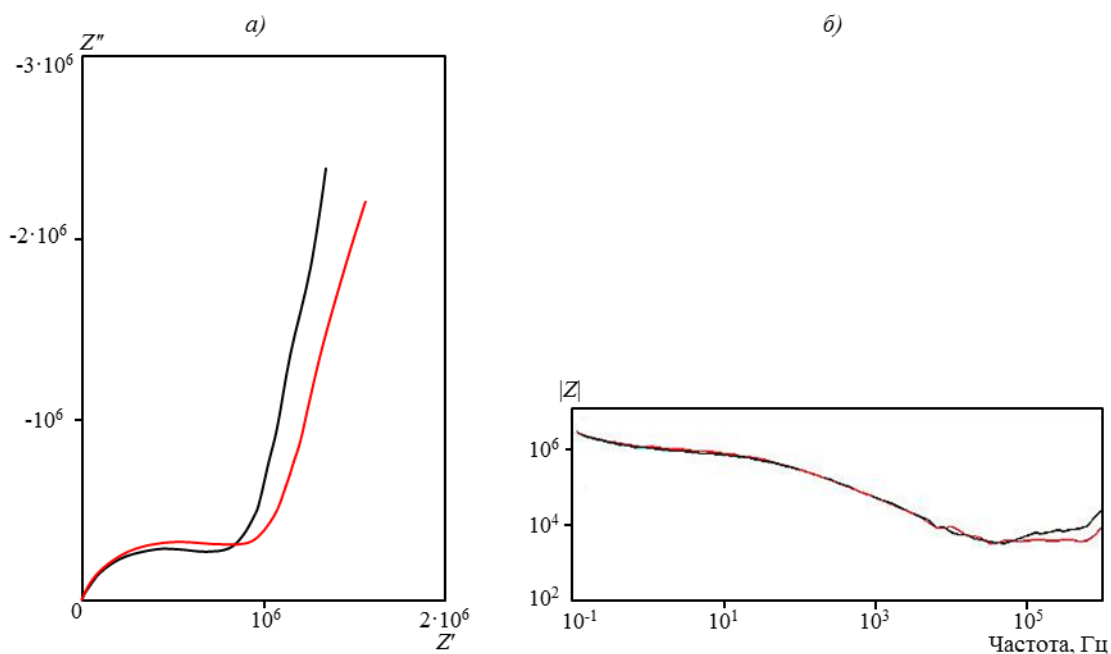


Рис. 2. Диаграммы Найквиста (а) и Боде (б) для образцов с анодно-оксидным покрытием



Рис. 3. Внешний вид покрытий, уплотненных в разработанном растворе

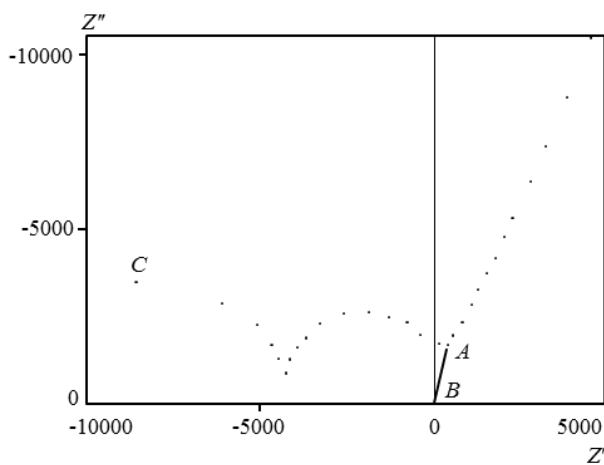


Рис. 4. Диаграмма Найквиста для системы анодно-оксидного покрытия в области высоких частот

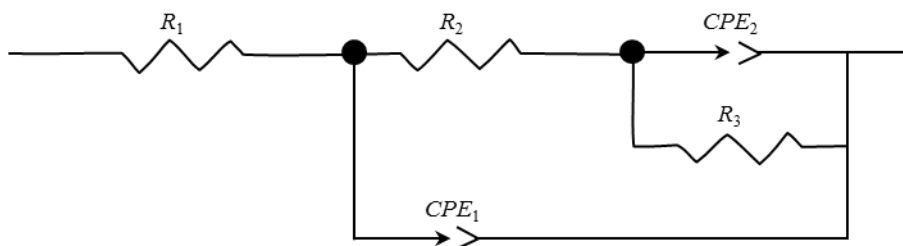


Рис. 5. Эквивалентная схема системы «сплав/анодно-оксидное покрытие/электролит (раствор 3%-ного NaCl)»: R_1 – сопротивление электролита; CPE_1 и R_2 – элемент, представляющий собой емкость, и сопротивление покрытия; CPE_2 и R_3 – элемент, представляющий собой сопротивление электрохимическим процессам в порах покрытия

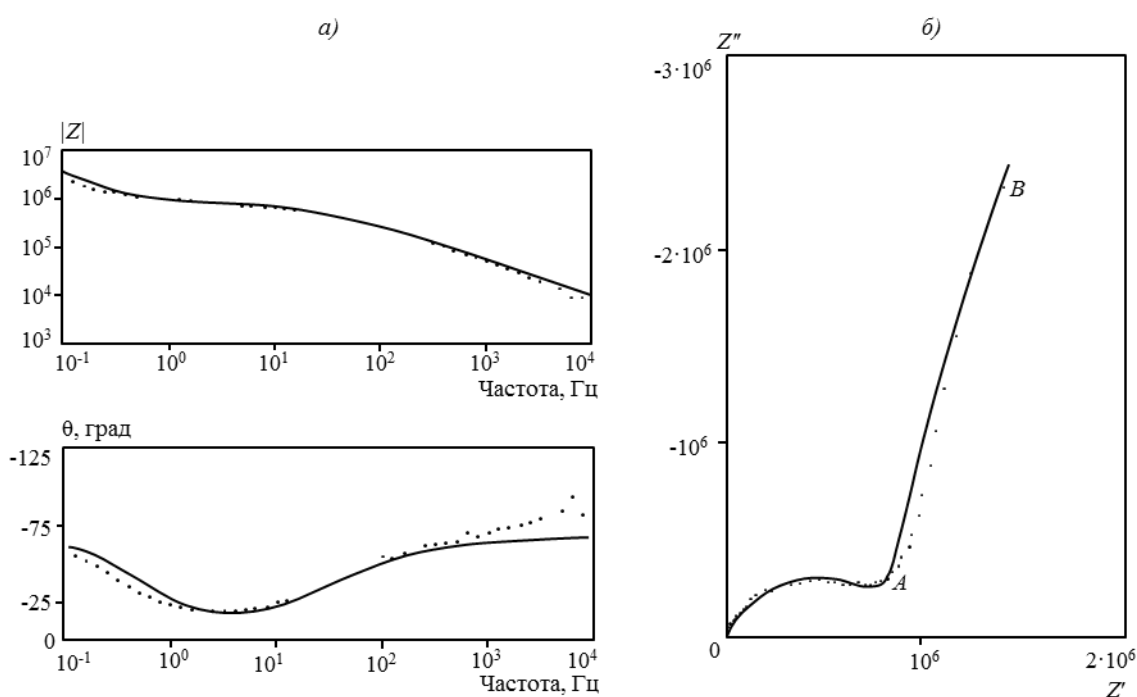


Рис. 6. Диаграммы Бode (а) и Найквиста (б) с экспериментальными (•••) и расчетными (—) данными исследуемой системы «сплав/анодно-оксидное покрытие/электролит (раствор 3%-ного NaCl)»

Таблица 3

Параметры анодно-оксидных покрытий на образцах из алюминиевого сплава,

Условный номер образца	Емкость $CPE \cdot T \cdot 10^8, \Phi/\text{см}^2$	Сопротивление, Ом/см ²	
		$R_n \cdot 10^{-6}$	$R_3 \cdot 10^{-7}$
1	2,91	0,88	2,32
2	1,20	1,62	2,10
3	1,11	1,45	1,89
4	3,06	0,88	2,83
5	1,90	0,93	2,42
Среднее значение	2,04	1,15	2,31

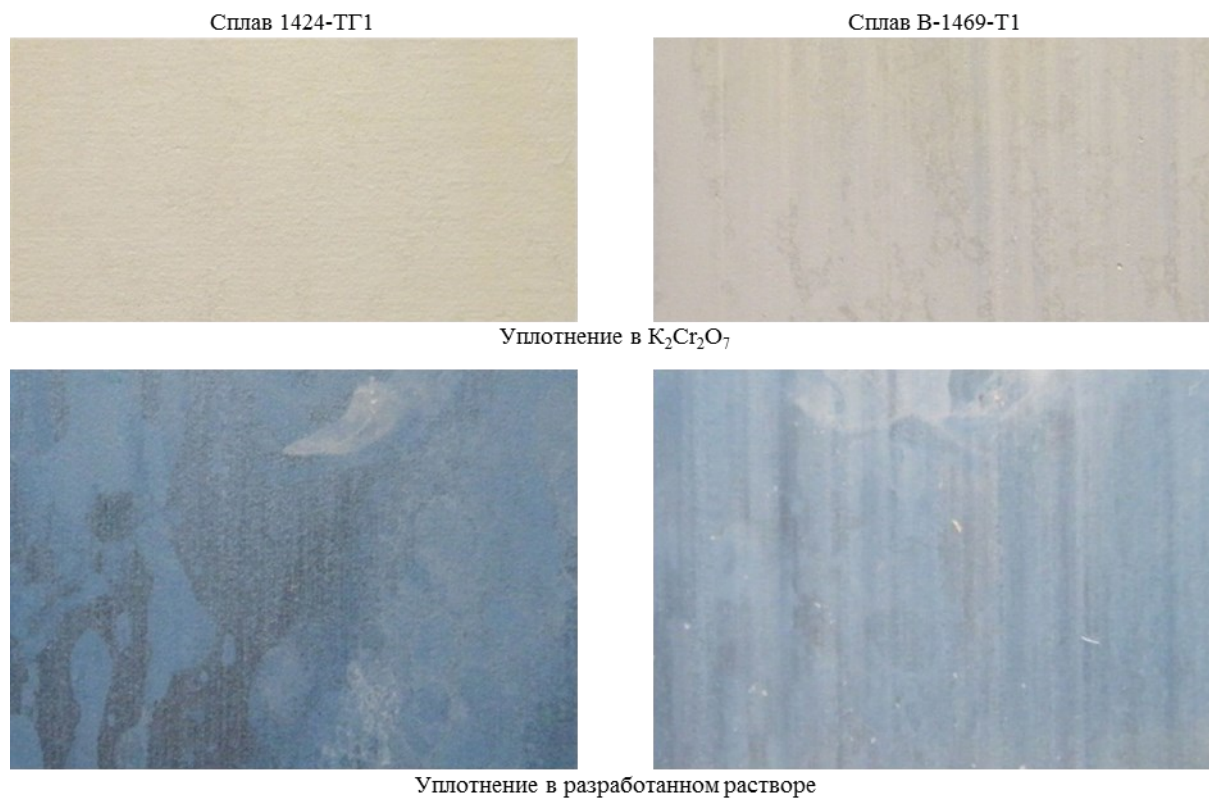


Рис. 7. Результаты коррозионных испытаний в камере солевого тумана в течение 750 ч алюминийлитиевых сплавов 1424-ТГ1 и В-1469-Т1

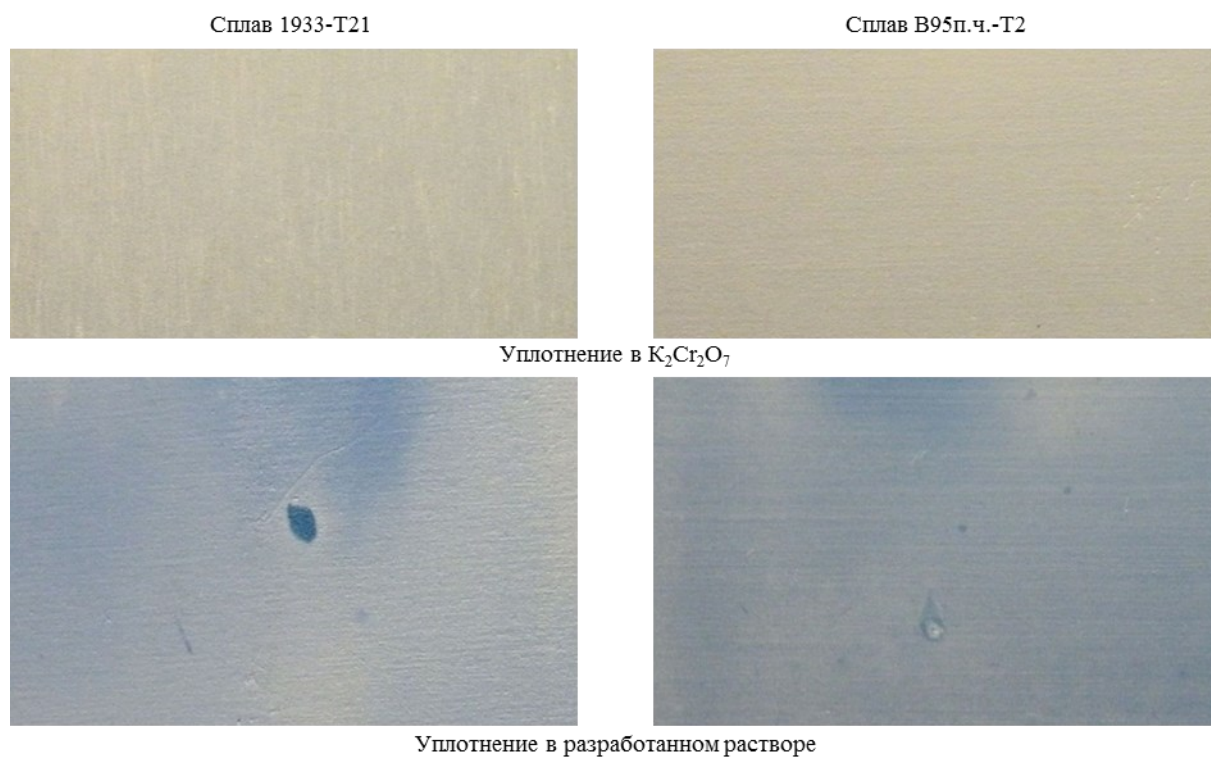


Рис. 8. Результаты коррозионных испытаний в камере солевого тумана в течение 750 ч алюминийлитиевых сплавов 1933-Т2 и В95п.ч.-Т2

Таблица 4

Адгезия стандартных лакокрасочных покрытий по ГОСТ 15140

Сплав	Система ЛКП	Адгезия (анодно-оксидное покрытие), балл
В95п.ч.-Т2	ЭП-0215г.с.+ЭП-076АК+АС-1115	1
	ЭП-0215Мг.с.+ВГ-28+ВЭ-69	1
	ЭП-0215г.с.+ЭП-076АК+ВЭ-69	1
1933-Т2	ЭП-0215г.с.+ЭП-076АК+АС-1115	1
	ЭП-0215Мг.с.+ВГ-28+ВЭ-69	1
	ЭП-0215г.с.+ЭП-076АК+ВЭ-69	1
В-1469-Т1	ЭП-0215г.с.+ЭП-076АК+АС-1115	1
	ЭП-0215Мг.с.+ВГ-28+ВЭ-69	1
	ЭП-0215г.с.+ЭП-076АК+ВЭ-69	1
1424-ТГ2	ЭП-0215г.с.+ЭП-076АК+АС-1115	1
	ЭП-0215Мг.с.+ВГ-28+ВЭ-69	1
	ЭП-0215г.с.+ЭП-076АК+ВЭ-69	1

дет опять возрастать с уменьшением частоты (кривая *AB*), а на диаграмме Найквиста (рис. 6, б) появившаяся полуокружность сменится возрастающей кривой (*AB*).

По предложенной эквивалентной схеме подобраны электротехнические элементы, представленные на рис. 5. При полученных значениях сопротивлений и емкостей наблюдается удовлетворительное совпадение между расчетными и экспериментальными данными (см. рис. 6). Расчетные данные приведены в табл. 3.

Согласно полученной модели можно заключить, что покрытие, уплотненное по разработанной технологии, обладает достаточно высоким сопротивлением, что также подтверждается данными электрохимического метода снятия анодно-поляризационных кривых. Данное сопротивление численно можно описать величиной емкости *CPE-T* и поляризационного сопротивления R_p (см. табл. 3). Наличие ингибиторной защиты существенно замедляет электрохимический процесс, протекающий в порах покрытия, что приводит к увеличению его защитных свойств. Сопротивление электрохимическому процессу, осуществляемое ингибитором, характеризуется параметром R_3 , значения которого больше, чем значения величины R_p .

Сернокислотные анодно-оксидные покрытия, уплотненные стандартным методом в растворе бихромата калия, обладают высокими адгезионными свойствами и используются для подготовки поверхности деталей из алюминиевых сплавов перед склеиванием [24] и нанесением систем лакокрасочных покрытий [25]. Высокие адгезионные свойства поверхности необходимы для обеспечения надежной эксплуатации комбинированных (неметаллические неорганические покрытия+ЛКП) защитных покрытий. Проведено изуче-

ние адгезии трех систем наиболее эффективных лакокрасочных покрытий к поверхности алюминиевых сплавов с анодно-оксидными покрытиями, уплотненными в разработанном растворе.

Адгезию оценивали по ГОСТ 15140 методом решетчатых надрезов в исходном состоянии и после погружения в деминерализованную воду на 14 сут. Результаты представлены в табл. 4.

Обсуждение и заключения

Уплотнение сернокислотных анодно-оксидных покрытий при температуре 38–42°C в растворе, содержащем ингибиторы коррозии алюминия и краситель, обеспечивает защитные свойства покрытию, отвечающие требованиям международных стандартов. При ускоренных испытаниях в КСТ в течение 750 ч коррозионные поражения на поверхности образцов с покрытиями отсутствуют (рис. 7 и 8).

Окрашивание покрытия в процессе уплотнения позволяет выявить дефекты на поверхности обработанных алюминиевых сплавов (трещины, закаты, включения и т. д.), а также фиксировать наличие покрытия.

Оценка защитных свойств покрытия, полученная при проведении коррозионных испытаний в КСТ и электрохимическими методами, подтвердила высокие защитные свойства покрытия.

Применение импедансного метода позволило количественно определить защитные характеристики покрытия, а также выявить значительный вклад в защитную способность покрытия ингибиторной защиты, реализуемой вследствие наполнения покрытия по новой технологии, имеющей существенное преимущество по сравнению со стандартной технологией по экологичности процесса и энергоемкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 17–21.
3. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
4. Каримова С.А., Павловская Т.Г. Разработка способов защиты от коррозии конструкций, работающих в условиях космоса //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 02 (viam-works.ru).
5. Шрейдер А.В. Оксидирование алюминия и его сплавов. М.: Металлургиздат. 1960. 220 с.
6. Верник С. Химическая и электрохимическая обработка алюминия и его сплавов: Пер. с англ. М.: Судпромиздат. 1960. 218 с.
7. Щербаков А.И., Оше Е.К., Скворцова И.В. и др. Формирование нанопористых анодно-оксидных пленок на чистом алюминии в воде //Физикохимия поверхности и защита материалов. 2014. №2. С. 176–180.
8. Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию. М.: Машиностроение. 1988. 132 с.
9. Томашов Н.Д., Тюкина М.Н., Заливалов Ф.П. Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. М.: Машиностроение. 1968. 156 с.
10. Сивоконь И.С. Материальный баланс распределения ингибиторов коррозии при лабораторном тестировании и промышленном применении //Коррозия: материалы, защита. 2013. №6. С. 8–18.
11. Ткаленко Д.А., Венкатесваран Г., Вишневская Ю.П. и др. Ингибирующее действие цистеина в кислых средах //Физикохимия поверхности и защита материалов. 2010. №5. С. 537.
12. Mansfeld F. Use of electrochemical impedance spectroscopy for the study of corrosion protection by polymer coating //Journal of Applied Electrochemistry. 1995. V. 25. P. 187–202.
13. Liu X., Xiong J., Lv Y., Zuo Y. Study on corrosion electrochemical behavior of several different coating systems by EIS //Progress in Organic Coatings. 2009. V. 64. №4. P. 497–503.
14. Bordziłowski J., Królikowska A., Bonora P.L. et al. Underwater EIS measurements //Progress in organic coatings. 2010. V. 67. №4. P. 414–419.
15. Голубев А.И. Анодное окисление алюминиевых сплавов. М.: АН СССР. 1961. 199 с.
16. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
17. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л. и др. Алюминийлитиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992.
18. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 183–195.
19. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 18–22.
20. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В. и др. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 05 (viam-works.ru).
21. Раствор для уплотнения анодно-оксидного покрытия алюминиевых сплавов: пат. 2447201 Рос. Федерация; опубл. 10.04.2012.
22. Tran A.T., Huet F., Ngo K., Rousseau P. Artefacts in electrochemical impedance measurement in electrolytic solutions due to the reference electrode //Electrochimica Acta. 2011. V. 56. №23. P. 8034–8039.
23. Wen L., Wang Y., Zhou Y. et al. Corrosion evaluation of microarc oxidation coatings formed on 2024 aluminium alloy //Corrosion Science. 2010. V. 52. №8. P. 2687–2696.
24. Каримова С.А., Павловская Т.Г., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевых сплавов с применением анодного оксидирования //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №4. С. 34–38.
25. Семенова Л.В., Малова Н.Е., Кузнецова В.А., Пожого А.А. Лакокрасочные материалы и покрытия //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 315–327.