

Научная статья

УДК 620.193

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОНТАКТНОЙ КОРРОЗИИ

Л.И. Закирова¹, С.В. Сибилева¹, С.А. Демин¹, В.А. Дуюнова¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведены исследования гальванических покрытий коррозионностойких сталей для предотвращения контактной коррозии алюминиевых сплавов: выбраны способы подготовки поверхности, определены оптимальные режимы нанесения и термообработки покрытий. По результатам ускоренных коррозионных испытаний конструктивно-подобных образцов в камере солевого тумана определены гальванические покрытия коррозионностойких сталей, обладающие высокой защитной способностью в условиях возникновения контактной пары «коррозионностойкая сталь/алюминий».

Ключевые слова: алюминиевый сплав, гальваническое покрытие, электроосаждение, цинковое покрытие, кадмиевое покрытие, покрытие сплавами, гальванотермическое покрытие, ускоренные коррозионные испытания, конструктивно-подобный образец

Для цитирования: Закирова Л.И., Сибилева С.В., Демин С.А., Дуюнова В.А. Исследование гальванических покрытий коррозионностойких сталей для предотвращения контактной коррозии // Труды ВИАМ. 2024. № 9 (139). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53.

Scientific article

INVESTIGATION OF ELECTROPLATING OF CORROSION-RESISTANT STEELS TO PREVENT CONTACT CORROSION

L.I. Zakirova¹, S.V. Sibileva¹, S.A. Demin¹, V.A. Duyunova¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Electroplating coatings of corrosion-resistant steels have been studied to prevent contact corrosion of aluminum alloys: methods of surface preparation have been selected, optimal modes of coating application and heat treatment have been determined. Based on the results of accelerated corrosion tests of structurally similar samples in the salt mist chamber, galvanic coatings of corrosion-resistant steels with high protective ability under conditions of occurrence of a corrosion-resistant steel/aluminum contact pair were determined.

Keywords: aluminum alloy, electroplating, electrodeposition, zinc coating, cadmium coating, alloy coating, galvanothermal coating, accelerated corrosion tests, structurally similar sample.

For citation: Zakirova L.I., Sibileva S.V., Demin S.A., Duyunova V.A. Investigation of electroplating of corrosion-resistant steels to prevent contact corrosion. *Trudy VIAM*, 2024, no. 9 (139), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53.

Введение

Усовершенствование конструкций летательных аппаратов и транспортных средств приводит к необходимости в сочетании различных металлических деталей, контактирующих друг с другом внутри конструкции [1].

В настоящее время алюминиевые сплавы благодаря прочности, легкости и простоте обработки имеют большое значение при изготовлении деталей и узлов машин [2–5].

Алюминий и его сплавы в контакте со сталями образуют контактную гальваническую пару «коррозионностойкая сталь/алюминий», в которой алюминий, имея более отрицательный электрохимический потенциал, является анодом и подвергается интенсивному коррозионному разрушению. Данная проблема возникает при фиксации конструкций на основе алюминия с помощью стального крепежа в строительной отрасли [6, 7], судостроении [8] и авиастроении [9]. В процессе длительной эксплуатации конструкций из алюминиевых сплавов коррозионный процесс в условиях возникновения контактной пары развивается в 100–150 раз активнее, чем при отсутствии контакта.

Одним из методов защиты алюминия и его сплавов от контактной коррозии в условиях возникновения контактной пары «коррозионностойкая сталь/алюминий» является осаждение на детали из стали металлических покрытий. Наиболее подходящими являются покрытия из кадмия и цинка, которые во многих условиях имеют близкие с алюминием электродные потенциалы, однако кадмиевое покрытие токсично и экологически опасно, поэтому в современных изделиях авиационной техники стараются минимизировать его использование [10].

В отечественной практике для предотвращения контактной коррозии детали из коррозионностойких сталей подвергают химической пассивации, а затем устанавливают на изделие с использованием грунта, пасты или герметика [6]. Однако указанные мероприятия не обеспечивают эффективной защиты в процессе эксплуатации.

Компанией Siemens разработана технология Sigal® [11] для гальванического алюминирования стальных изделий с целью улучшения антикоррозионных качеств и декоративных свойств. Процесс электроосаждения алюминия проводят в узком диапазоне катодной плотности тока в органических апротонных растворителях (толуол или ксилол). Электролиты алюминирования являются неустойчивыми, а получаемые таким способом покрытия имеют недостаточную адгезию к поверхности стальных деталей [12–14]. Процесс затруднен применением закрытых электролизеров с инертной атмосферой во избежание контакта электролитов с атмосферой воздуха. Кроме того, промывка деталей с покрытием осуществляется в органических растворителях. Указанные недостатки ограничивают применение электролитов алюминирования в промышленных масштабах.

Необходимо отметить, что применяемые в настоящее время покрытия не обеспечивают необходимую защиту от контактной коррозии в процессе длительной эксплуатации изделия, поэтому разработка технологии получения защитного гальванического покрытия коррозионностойкой стали для предотвращения контактной коррозии алюминиевых сплавов является актуальной задачей.

Наиболее перспективными являются смешанные цинковые покрытия сплавами с добавлением электроположительных элементов (никель, олово) для смещения потенциала коррозии цинка в положительную область и уменьшения разности потенциалов пары «алюминиевый сплав–гальваническое покрытие» [15–19], а также гальванотермические покрытия системы «цинк–олово» [20, 21].

Прочность сцепления гальванического покрытия со сталью зависит от качества подготовки поверхности. Наличие на поверхности стали плотной пассивной пленки препятствует нанесению гальванических покрытий, поэтому особое внимание необходимо уделить подготовке поверхности деталей из коррозионностойких сталей, которая включает операции обезжиривания, активации и нанесения подслоя никеля.

Существуют следующие способы активации поверхности деталей из коррозионностойких сталей перед нанесением гальванических покрытий:

– *химическая обработка в кислотных растворах:*

– травление в растворе плавиковой кислоты в ультразвуковой ванне с последующей промывкой в ацетоне и сушкой в атмосфере горячего азота для предотвращения пассивации стали на воздухе; второй вариант подразумевает промывку в метиловом спирте и сушку в сосуде, в котором создают разряжение, затем вакуум снимают подачей газообразного азота [22];

– травление в растворе соляной кислоты с концентрацией от 50 до 100 г/л в течение 15–45 с [23];

– *электрохимическая обработка в кислотных растворах:*

– в растворе серной кислоты с концентрацией от 10 до 20 % (по массе) сначала при анодной, а затем при катодной плотности тока от 3 до 10 А/дм² [24];

– в растворе соляной кислоты с концентрацией от 50 до 310 г/л при катодной плотности тока от 3 до 5 А/дм² в течение 5–10 мин с последующим осаждением подслоя никеля толщиной не более 1 мкм [25];

– в растворе серной кислоты с концентрацией от 5,0 до 18,5 % (по массе) сначала при анодной, а затем при катодной плотностях тока 5 А/дм² в течение 5–10 мин с последующим нанесением подслоя никеля толщиной не более 1 мкм [25];

– *электрохимическая обработка в кислотных растворах, содержащих соли никеля:*

– в водных растворах серной или соляной кислот, дополнительно содержащих соли никеля, при катодной плотности тока от 2,5 до 10,0 А/дм² [26];

– в водном растворе соляной кислоты с увеличенной концентрацией солей никеля и выдержкой детали без тока с последующей обработкой при повышенной плотности тока [23].

Среди перечисленных методов подготовки поверхности коррозионностойких сталей преимуществом обладает электрохимическая обработка в кислотных растворах, содержащих соли никеля, так как в данном процессе одновременно осуществляется травление и нанесение никелевого подслоя, что упрощает процесс подготовки поверхности.

Материалы и методы

В работе использовали следующие образцы:

– из алюминиевого сплава 1441 (алюминий-литиевый сплав системы Al–Cu–Mg–Li) размером 50×50×2 мм;

– из коррозионностойкой стали 08X18H10 размером 50×50×2 мм и шайбы М5.

Для приготовления растворов обезжиривания, травления, активации, электрохимического осаждения и пассивации использовали реактивы марок «хч» или «чда».

Термообработку образцов с покрытием проводили в воздушной среде в сушильном шкафу.

Образцы из алюминиевого сплава 1441 химически обезжиривали, травили, осветляли, анодировали в растворе серной кислоты и наполняли в растворе бихромата калия (покрытие Ан.Окс.нхр). Торцы изолировали эмалью ЭП-0215.

Образцы из стали 08X18H10 обезжиривали в горячем фосфатно-щелочном растворе при температуре 65 °С в течение 10 мин [23]. Контроль качества обезжиривания проводили в соответствии с ГОСТ 9.402–2004 [27] при испытании методом смачиваемости с определением времени до разрыва пленки воды.

Активацию поверхности деталей из коррозионностойкой стали и нанесение никелевого подслоя проводили в соответствии с ГОСТ 9.305–84 [23].

Прочность сцепления гальванических покрытий с поверхностью образцов из стали 08X18H10 определяли двумя методами: нагрева и нанесения сетки царапин (метод рисок) [28]. При испытаниях методом нагрева образцы с покрытиями нагревали до заданной температуры и выдерживали в течение 1 ч, далее охлаждали на воздухе и проверяли на наличие вздутий и отслаиваний покрытия. При испытаниях методом нанесения сетки царапин наносили три параллельные риски с расстоянием между ними от 2 до 3 мм и перпендикулярно к ним также три параллельные риски и проверяли на наличие отслаивания покрытия между линиями и в сетке квадратов.

Микроструктуру образцов из стали 08X18H10 с гальваническими покрытиями, нанесенными по различным режимам, исследовали на растровом электронном микроскопе с приставкой для электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА) энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором.

Конструктивно-подобный образец (КПО) представлял собой болтовое соединение образца из алюминиевого сплава 1441 с Ан.Окс.нхр размером 50×50×2 мм и шайбы М5 из стали 08X18H10 с гальваническим покрытием (рис. 1). Для соединения использовали болт и гайку М4 из стали 30ХГСА с кадмиевым покрытием толщиной 6 мкм с дополнительной хроматной обработкой. Для предотвращения контактной коррозии устанавливали полиамидную шайбу М4 на лицевой стороне КПО между болтом и шайбой из коррозионностойкой стали и на тыльной стороне КПО между гайкой М4 и образцом из алюминиевого сплава. Соотношение площади алюминия к стали 3,6:1.

Защитную способность гальванических покрытий в среде хлоридов определяли методом ускоренных коррозионных испытаний в камере солевого тумана (КСТ) при температуре 35±2 °С и относительной влажности 95 % при непрерывном распылении нейтрального 5%-ного водного раствора хлористого натрия [29]. На рис. 1 представлена схема размещения КПО в камере солевого тумана.

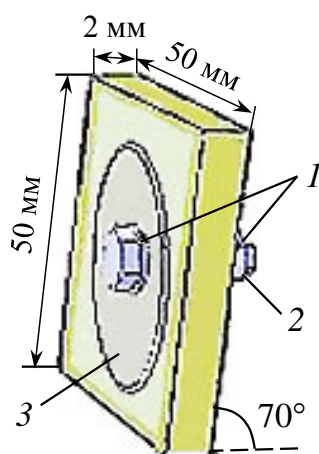


Рис. 1. Схема размещения конструктивно-подобного образца в камере солевого тумана: 1 – шайбы М4 из полиамида; 2 – болт и гайка М4 из стали 30ХГСА с покрытием Кдб.хр; 3 – шайба М5 из стали 08X18H10

Результаты и обсуждение

Для определения эффективности антикоррозионных гальванических покрытий в условиях возникновения контактной пары «коррозионнотойкая сталь/алюминий» исследовали кадмиевое (Кд9), цинковое (Ц9) и гальванотермические покрытия систем «цинк–олово» (Ц4О2) и «цинк–олово–цинк–олово» (Ц4О4Ц2О1), а также покрытия сплавами систем «цинк–никель» (Ц-Н(85)9) и «олово–цинк» (О-Ц(80)9).

Проведено исследование влияния наличия никелевого подслоя на образцах из коррозионнотойкой стали 08Х18Н10 на прочность сцепления гальванических покрытий с поверхностью. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Прочность сцепления гальванических покрытий с поверхностью образцов из стали 08Х18Н10

Подслой никеля	Покрытие	Метод определения прочности сцепления покрытий	
		нагрева	нанесения сетки царапин
В соответствии с ГОСТ 9.305–84 [23]	Ц9 Кд9 Ц4О4Ц2О1 Ц4О2 Ц-Н(85)9 О-Ц(80)9	Отсутствие вздутий и отслаивания покрытия	Отсутствие отслаивания покрытия между линиями и в сетке квадратов
	Кд9 О-Ц(80)9		
Без подслоя никеля	Ц9 Ц4О4Ц2О1 Ц4О2 Ц-Н(85)9	Отсутствие вздутий и отслаивания покрытия	Наличие отслаивания покрытия между линиями и в сетке квадратов
	Кд9 О-Ц(80)9		

По результатам определения прочности сцепления покрытий методами нагрева и нанесения сетки параллельных царапин установлено, что предварительное нанесение никелевого подслоя значительно повышает адгезию гальванических покрытий к образцам из коррозионнотойкой стали. Для дальнейших исследований применяли технологию нанесения никелевого подслоя в соответствии с ГОСТ 9.305–84 [23].

Нанесение гальванических покрытий сплавами представляет собой определенную сложность ввиду необходимости контроля содержания элементов, формирующих покрытие, а также контроля структуры. Для исследований структуры гальванических покрытий из сплава Ц-Н(85)9, полученных при различных режимах на образцах из коррозионнотойкой стали с подслоем никеля, проведен качественный ЭЗМА, результаты представлены на рис. 2 и 3.

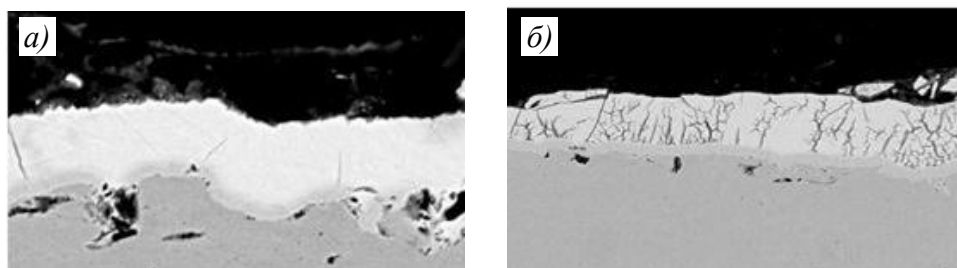


Рис. 2. Микроструктуры покрытий сплава системы «цинк–никель» Ц-Н(85)9, полученных по режимам осаждения 1 (а) и 2 (б)

Исследования микроструктуры покрытия из сплава системы «цинк–никель» Ц-Н(85)9 показали, что в составе покрытий кроме никеля и цинка присутствует кислород. В покрытии, полученном при более высокой плотности тока (режим 2), наблюдаются единичные вертикальные сквозные трещины (рис. 2, б). Сформированные покрытия имеют слоистую структуру, состоящую из подслоя никеля и покрытия сплавами с содержанием 85 % (по массе) цинка и 15 % (по массе) никеля.

Исследования структуры гальванических покрытий из сплава системы «олово–цинк» О-Ц(80)9, полученных при различных режимах, представлены на рис. 3.

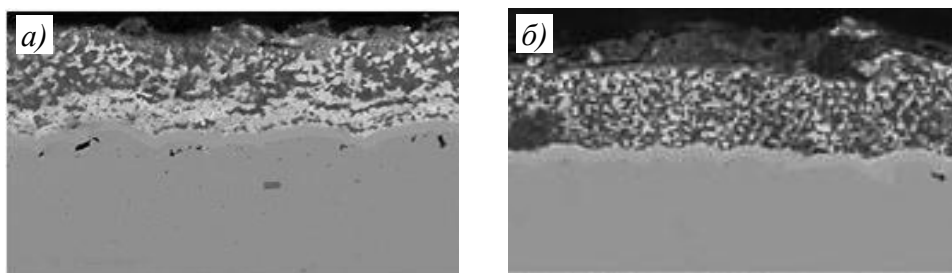


Рис. 3. Микроструктуры покрытий сплава системы «олово–цинк» О-Ц(80)9, полученных по режимам осаждения 1 (а) и 2 (б)

Исследования микроструктуры покрытия из сплава системы «олово–цинк» О-Ц(80)9 показали наличие двухфазной структуры (рис. 3), где металлические включения цинка распределены в оловянном покрытии. Вблизи никелевого подслоя наблюдается слоистая структура, состоящая из слоя сплава системы «олово–цинк». При повышении плотности тока (режим 2) на поверхности образуется слой толщиной от 1 до 2 мкм сплава системы «цинк–олово» с большим содержанием цинка. По данным качественного ЭЗМА, в составе покрытия кроме основных элементов присутствует кислород.

По результатам качественного анализа установлено, что оптимальным режимом для нанесения гальванических покрытий из сплавов систем «цинк–никель» Ц-Н(85)9 и «олово–цинк» О-Ц(80)9 является режим с пониженной плотностью тока, который не приводит к образованию дефектов и трещин в покрытии и позволяет формировать покрытия с необходимым составом легирующих компонентов.

Проведены ускоренные коррозионные испытания КПО, в которых на коррозионностойкую сталь нанесены гальванические покрытия: кадмиевое, цинковое, а также покрытия из сплавов систем «олово–цинк» и «цинк–никель». В табл. 2 представлен внешний вид КПО после 90 сут испытаний. После разборки КПО осмотрена поверхность алюминиевых пластин и шайб из коррозионностойкой стали на наличие коррозионных повреждений.

Для гальванотермических покрытий системы «цинк–олово» характерна зависимость защитных свойств от режима термообработки. При исследованиях проводили одноступенчатую (режим 1) и двухступенчатую (режим 2) термообработку. Результаты коррозионных испытаний КПО с гальванотермическими покрытиями после 90 сут экспозиции в КСТ приведены в табл. 3.

Ускоренные коррозионные испытания показали, что лучшей защитной способностью в условиях контакта «алюминиевый сплав/коррозионностойкая сталь» обладает гальванотермическое покрытие Ц40Ц201.т.хр с двухступенчатым режимом термообработки.

Таблица 2

Внешний вид конструктивно-подобных образцов после испытаний в камере солевого тумана в течение 90 сут


































Покрытие	В сборе	В разобранном виде	
Без покрытия			
Кд9.хр			
Ц9.хр			
О-Ц(80)9.хр			
Ц-Н(85)9.хр			

Таблица 3

Внешний вид конструктивно-подобных образцов с гальванотермическими покрытиями после испытаний в камере солевого тумана в течение 90 сут

Покрытие	Режим термообработки	В сборе	В разобранном виде	
Ц402.т.хр	1			
	2			
Ц404Ц2.т.хр	1			
	2			
Ц404Ц201.т.хр	1			
	2			

Заключения

Защита деталей из алюминиевых сплавов и коррозионностойких сталей от контактной коррозии – нерешенная и актуальная задача.

Основной проблемой можно считать высокую разницу электрохимических потенциалов в системе «коррозионнотойкая сталь/алюминиевые сплавы», что при наличии коррозионно-активной среды приводит к значительному увеличению скорости коррозионных процессов. Для решения данной проблемы разрабатываются системы противокоррозионной защиты, включающие изолирующие материалы и новые перспективные покрытия. Один из подходов – нанесение на алюминиевый сплав изоляционного анодного покрытия и защитного гальванического покрытия на коррозионнотойкую сталь. В данной работе исследованы различные классы гальванических покрытий, нанесенных на коррозионнотойкие стали, включая покрытия сплавами, и гальванотермические покрытия системы «цинк–олово», а также методы подготовки поверхности для обеспечения адгезии. Установлено, что для подготовки поверхности коррозионнотойких сталей наилучшую адгезию защитных покрытий обеспечивает электрохимическая обработка в соляной кислоте с солями никеля с последующей обработкой при повышенной плотности тока. Предварительные ускоренные коррозионные испытания в камере солевого тумана показали эффективность гальванотермических покрытий системы «цинк–олово» с двухступенчатой термообработкой, однако проблема требует дальнейшего изучения и проведения дополнительных исследований и коррозионных испытаний.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
2. Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З., Каблов Е.Н. *Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике* / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
3. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Гирш Р.И., Серебренникова Н.Ю., Коновалов А.Н. Конструируемые слоистые материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов и стеклопластиков в конструкциях летательных аппаратов нового поколения // *Вестник машиностроения*. 2020. № 12. С. 46–52.
4. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Оглодкова Ю.С., Оглодков М.С. Опыт и перспективы применения алюминий-литиевых сплавов в изделиях авиационной и космической техники // *Металлург*. 2021. № 1. С. 62–70.
5. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
6. Синявский В.С., Калинин В.Д. Коррозионная долговечность алюминиевых сплавов и коррозионнотойких сталей в подконструкциях вентилируемых фасадов // *Стройпрофиль*. 2011. № 6. С. 27–28.
7. Жирнов А.Д., Каримова С.А., Головина В.М. Коррозионная стойкость и защита алюминиевых сплавов в строительных конструкциях // *Стройпрофиль*. 2010. № 2. С. 30–31.
8. Стогний Г.В. Перспективы исследования контактной коррозии металлов в современном корабле- и судостроении // *Водный транспорт*. 2013. № 2. С. 43–51.
9. ГОСТ 9.005–72. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, металлические и неметаллические неорганические покрытия. Допустимые и недопустимые контакты с металлами и неметаллами. М.: Стандартинформ, 2008. 28 с.

10. Navinsek B., Panjan P., Milosev I. PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless processes // *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol. 116–119. P. 476–487.
11. The Sigal process for electrodeposition of aluminium // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. Emerald Publishing Limited / Editor: Professor Yu Yan. 1985. Vol. 32 No. 7. P. 13.
12. Enders B., Krauß S., Wolf G.K. Corrosion properties of aluminum based alloys deposited by ion beam assisted deposition // *Surface and Coatings Technology*. 1994. Vol. 65. P. 203–207.
13. Jianming X., Weijiang Z., Wolf G.K. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on CK45 steel deposited by IBAD // *Surface and Coatings Technology*. 2004. Vol. 187. P. 194–198.
14. Матыс В.Г., Поплавский В.В. Устойчивость алюминия и его сплава к контактной коррозии в гальванопарах со сталями с металлическими покрытиями // *Труды БГТУ: Химия и технология неорганических веществ*. 2015. № 3. С. 85–92.
15. Вячеславов П.М. Электролитическое осаждение сплавов. Л.: Машиностроение, 1977. 34 с.
16. Аверкин В.А. Электролитическое осаждение сплавов. М.: Машгиз, 1961. 120 с.
17. Кудрявцев Н.Т. Электролитические покрытия металлами. М.: Химия, 1979. 352 с.
18. Закирова Л.И., Лаптев А.Б. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 1. Морфология и коррозионная стойкость // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
19. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Деговец М.Л. Свойства защитных гальванических покрытий для замены кадмия на стальных крепежных деталях (обзор). Часть 2. Водородное охрупчивание и фрикционные характеристики // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
20. Каблов Е.Н., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В., Виноградов С.С. Перспективные покрытия для защиты от коррозии углеродистых сталей // *Сталь*. 2016. № 6. С. 70–81.
21. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Закирова Л.И. Замена кадмия. Этап 2 – заключительный. Гальванотермическое покрытие системы «цинк–олово» – реальная альтернатива кадмиевому покрытию // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 3 (56). С. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
22. Способ подготовки поверхности изделий из легкоокисляющихся металлов: пат. 368762 Япония; заявл. 26.08.70; опубл. 26.01.73.
23. ГОСТ 9.305–84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий. М.: Изд-во стандартов, 2003. 105 с.
24. Способ подготовки поверхности изделий из нержавеющей стали перед гальваническим никелированием: пат. 2201478 Рос. Федерация; заявл. 18.02.00; опубл. 27.03.03.
25. Давлатьян Т.А., Конарев А.А., Круглов В.С. и др. Электроосаждение меди на композитные ленты «серебро–нержавеющая сталь» // *Покрытия и обработка поверхности: сб. тез. докл. 10-й Междунар. конф. М., 2013. С. 30–31.*
26. Способ подготовки поверхности изделий из нержавеющей стали перед гальваническим меднением: пат. 2549037 Рос. Федерация; заявл. 03.07.13; опубл. 20.04.15.
27. ГОСТ 9.402–2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. М.: Стандартинформ, 2006. 43 с.
28. ГОСТ 9.302–88. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 2001. 40 с.
29. ГОСТ 9.308–85. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1990. 21 с.

References

1. Kablov E.N., Kuttyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 09, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
2. Illarionov E.I., Kolobnev N.I., Gorbunov P.Z., Kablov E.N. *Aluminum alloys in aerospace engineering*. Ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2001, 192 p.
3. Kablov E.N., Antipov V.V., Girsh R.I., Serebrennikova N.Yu., Konovalov A.N. Constructed layered materials based on sheets of aluminum-lithium alloys and fiberglass in the structures of new generation aircraft. *Vestnik mashinostroeniya*, 2020, no. 12, pp. 46–52.
4. Kablov E.N., Antipov V.V., Oglodkova Yu.S., Oglodkov M.S. Experience and prospects for the use of aluminum-lithium alloys in aviation and space technology. *Metallurg*, 2021, no. 1, pp. 62–70.
5. Kablov E.N., Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kuttyrev A.E. Application of Al–Mg–Si–Cu system aluminum alloy combined anodic dissolution for prognosis of tensile strength loss during natural exposure testing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
6. Sinyavskiy V.S., Kalinin V.D. Corrosion durability of aluminum alloys and corrosion-resistant steels in substructures of ventilated facades. *Stroyprofil*, 2011, no. 6, pp. 27–28.
7. Zhirnov A.D., Karimova S.A., Golovina V.M. Corrosion resistance and protection of aluminum alloys in building structures. *Stroyprofil*, 2010, no. 2, pp. 30–31.
8. Stogniy G.V. Prospects for studying contact corrosion of metals in modern shipbuilding and shipbuilding. *Vodnyy transport*, 2013, no. 2, pp. 43–51.
9. GOST 9.005–72. *Unified system of protection against corrosion and aging. Metals, alloys, metallic and non-metallic inorganic coatings. Permissible and unacceptable contacts with metals and non-metals*. Moscow: Standartinform, 2008, 28 p.
10. Navinsek B., Panjan P., Milosev I. PVD coatings as an environmentally clean alternative to electroplating and electroless processes. *Surface and Coatings Technology*, 1999, vol. 116–119, pp. 476–487.
11. The Sigal process for electrodeposition of aluminium. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. MCB UP Ltd, 1985, vol. 32, no. 7, p. 13. DOI: 10.1108/eb020360.
12. Enders B., Kraus S., Wolf G.K. Corrosion properties of aluminum based alloys deposited by ion beam assisted deposition. *Surface and Coatings Technology*, 1994, vol. 65, pp. 203–207.
13. Jianming X., Weijianga Z., Wolf G.K. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on CK45 steel deposited by IBAD. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 187, pp. 194–198.
14. Matys V.G., Poplavsky V.V. Resistance of aluminum and its alloy to contact corrosion in galvanic couples with steels with metallic coatings. *Trudy BGTU: Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv*, 2015, no. 3, pp. 85–92.
15. Vyacheslavov P.M. *Electrolytic deposition of alloys*. Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 34 p.
16. Averkin V.A. *Electrolytic deposition of alloys*. Moscow: Mashgiz, 1961, 120 p.
17. Kudryavtsev N.T. *Electrolytic coatings with metals*. Moscow: Khimiya, 1979, 352 p.
18. Zakirova L.I., Laptev A.B. Properties of protective electroplating coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 1. Morphology and corrosion resistance. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 37–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-37-46.
19. Laptev A.B., Zakirova L.I., Degovets M.L. Properties of protective galvanic coatings for replacement of cadmium on steel fixing parts (review). Part 2. Hydrogen embrittlement and frictional characteristics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 35–40. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-35-40.
20. Kablov E.N., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V., Vinogradov S.S. Promising coatings for corrosion protection of carbon steels. *Stal*, 2016, no. 6, pp. 70–81.
21. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Zakirova L.I. Cadmium replacement. Stage 2 – final. Galvanic thermal coating of zinc–tin system – real alternative to cadmium plating. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-59-66.
22. *Method for preparing the surface of articles made of easily oxidized metals*: pat. 368762 Japan; appl. 26.08.70; publ. 26.01.73.

23. State Standard 9.305–84. *Unified system of protection against corrosion and aging. Metallic and non-metallic inorganic coatings. Operations of technological processes for obtaining coatings.* Moscow: Publ. House of Standards, 2003, 105 p.
24. *Method for preparing the surface of stainless steel articles before galvanic nickel plating*: pat. 2201478 Rus. Federation; appl. 18.02.00; publ. 27.03.03.
25. Davlatyan T.A., Konarev A.A., Kruglov V.S. et al. Electrodeposition of copper on composite tapes «silver-stainless steel». *Coatings and surface treatment: Abstracts of reports.* 10th Int. Conf. Moscow, 2013, pp. 30–31.
26. *Method of surface preparation of stainless steel products before galvanic copper plating*: patent. 2549037 Rus. Federation; appl. 03.07.13; publ. 20.04.15.
27. State Standard 9.402–2004. *Unified system of corrosion and aging protection. Paint and varnish coatings. Preparation of metal surfaces for painting.* Moscow: Standartinform, 2006, 43 p.
28. State Standard 9.302–88. *Unified system of corrosion and aging protection (USCAP). Metallic and non-metallic inorganic coatings. Control methods.* Moscow: Publ. House of Standards, 2001, 40 p.
29. State Standard 9.308–85. *Unified System of Protection against Corrosion and Aging (USPA). Metallic and non-metallic inorganic coatings. Methods of accelerated corrosion testing.* Moscow: Publ. House of Standards, 1990, 21 p.

Информация об авторах

Закирова Лилия Ильдусовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Сибилева Светлана Владимировна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Демин Семен Анатольевич, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дуюнова Виктория Александровна, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Liliya I. Zakirova, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svetlana V. Sibileva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Semen A. Demin, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Victoria A. Duyunova, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.09.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.09.2024.
The article was submitted 04.09.2024; approved and accepted for publication after reviewing 06.09.2024.