

Научная статья

УДК 621.357.74

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76

ВЫБОР ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ ПРИ КОНТАКТЕ С АЛЮМИНИЕВЫМИ СПЛАВАМИ

Л.И. Закирова¹, С.В. Сибилева¹, А.И. Вдовин¹, М.А. Кольцова¹

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

Аннотация. Проведены электрохимические исследования образцов из коррозионно-стойких сталей 08X18H10 и 12X18H10T и алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 (с покрытиями и без покрытий): определены значения стационарных потенциалов, модуля импеданса, потенциала и плотности тока контактной коррозии, потенциала перепассивации. По результатам коррозионных испытаний в камере соляного тумана в течение 2160 ч пакетов образцов из коррозионно-стойких сталей с гальваническими покрытиями и алюминиевых сплавов (Ан.Окс.нхр) выбрано гальваническое покрытие, не уступающее по защитной способности кадмиевому покрытию.

Ключевые слова: электроосаждение, кадмиевое покрытие, покрытие сплавом, гальванотермическое покрытие, спектроскопия электрохимического импеданса, анодные и катодные поляризационные кривые, потенциал контактной коррозии, плотность тока контактной коррозии, ускоренные коррозионные испытания

Для цитирования: Закирова Л.И., Сибилева С.В., Вдовин А.И., Кольцова М.А. Выбор гальванического покрытия коррозионно-стойких сталей с целью защиты от коррозии при контакте с алюминиевыми сплавами // Труды ВИАМ. 2025. № 9 (151). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76.

Scientific article

SELECTION OF ELECTRODEPOSITED COATING ON CORROSION-RESISTANT STEELS FOR CORROSION PROTECTION IN CONTACT WITH ALUMINIUM ALLOYS

L.I. Zakirova¹, S.V. Sibileva¹, A.I. Vdovin¹, M.A. Koltsova¹

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

Abstract. The paper presents the results of electrochemical studies of samples of corrosion-resistant steels (08kH18N10, 12kH18N10T) and aluminum alloys (1163, B95, 1933) both with and without coatings. We have determined the values of the steady-state potentials, impedance modulus, the potential and current density of contact corrosion, and the passivation potential. Based on the results of 2160-hour corrosion tests in the salt spray chamber on samples packages made of corrosion-resistant steels with electroplating and aluminum alloys with non-chromated anodic coating, we have selected an electrodeposited coating that is as good as cadmium coating in its protective ability.

Keywords: electrodeposition, cadmium coating, alloy coating, electrodeposited coating, electrochemical impedance spectroscopy, anodic and cathodic polarization curves, contact corrosion potential, contact corrosion current density, accelerated corrosion tests

For citation: Zakirova L.I., Sibileva S.V., Vdovin A.I., Koltsova M.A. Selection of electrodeposited coating on corrosion-resistant steels for corrosion protection in contact with aluminium alloys. *Trudy VIAM*, 2025, no. 9 (151), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-9-63-76.

Введение

В экологических нормах предъявляются строгие требования к автомобильной и авиационной промышленности по сокращению выбросов загрязняющих веществ за счет производства все более энергоэффективных транспортных систем. В настоящее время основные усилия в этих отраслях направлены на снижение массы изделий, замену некоторых сталей более легкими сплавами [1, 2].

В отечественном самолетостроении основным материалом для обшивки фюзеляжа являются листы из алюминиевого сплава 1163-АТВ на основе системы Al–Cu–Mg. Для верхней панели крыла применяется высокопрочный алюминиевый сплав В950.ч.-Т1 системы Al–Zn–Mg–Cu, из которого также производят фюзеляж и рамы [3]. При производстве панелей крыла применяют болтовое и заклепочное соединения, так как данный сплав склонен к растрескиванию при сварке [4].

Одним из основных материалов для изготовления деталей внутреннего силового набора современных изделий авиационной техники является высокопрочный алюминиевый сплав 1933 [5, 6], который выпускают в виде поковок, штамповок, массивных прессованных полос толщиной до 250 мм.

К крепежным элементам, применяемым при производстве авиационных конструкций, предъявляются повышенные требования к прочности и коррозионной стойкости, поэтому использование коррозионностойкой стали в качестве основного материала для изготовления крепежа является приоритетным направлением [7].

Таким образом, в усовершенствованных конструкциях различных летательных аппаратов возрастает количество контактов разнородных металлов, что значительно увеличивает риск образования гальванической пары при отсутствии изоляции между контактирующими поверхностями в условиях эксплуатации при воздействии влаги и других агрессивных факторов, что приводит к усиленной контактной коррозии одной из деталей [8, 9].

Сведения о контактной коррозии изложены как в научных монографиях, обзорах и статьях, так и в стандартах [10]. Наиболее полно контактная коррозия рассмотрена в монографии [11], в которой большое внимание уделено также контактной коррозии в атмосферных условиях. Американским обществом ASTM в серии STP выпущена книга, посвященная контактной и питтинговой коррозии [12]. Обзор по контактной коррозии в атмосферных условиях представлен в работе [13].

На шкале потенциалов распространенные металлы перечислены в порядке от наиболее анодных до наиболее катодных (благородных). Чем дальше друг от друга находятся металлы в этом ряду, тем больше разница и скорость коррозии между ними. Судя по шкале потенциалов, алюминий более электроотрицателен, чем железо. На скорость коррозии также влияет площадь поверхности анода по сравнению с катодом. Например, небольшой винт из нержавеющей стали в мачте большой яхты, сделанной из алюминия, будет вызывать коррозию алюминия от незначительной до умеренной, но небольшой алюминиевый винт в большом фитинге из нержавеющей стали с морской водой будет означать, что маленький алюминиевый винт очень быстро прокорродирует. Поэтому следует избегать контакта разнородных металлов в местах, где может скапливаться влага.

Для повышения коррозионной стойкости деталей из стали широко применяются металлические покрытия, которые защищают от коррозии не только стальную деталь, но и контактирующие материалы из других более электроотрицательных металлов. Например, соединение деталей из стали и алюминиевого сплава без покрытия

в присутствии электропроводящего электролита приводит к интенсивному коррозионному поражению алюминиевых деталей.

Для защиты стальных деталей широко применяется кадмирование и цинкование, так как эти металлы по своим электрохимическим свойствам близки к алюминию [14]. Недостатками цинковых покрытий являются их низкая коррозионная стойкость и непродолжительная защита, особенно в условиях морской атмосферы, поэтому для защиты стальных изделий, эксплуатируемых в морской атмосфере, используют кадмиевое покрытие. Однако кадмий токсичен и вреден для окружающей среды, поэтому его применение в авиастроении сокращается [15–17]. Существующие альтернативы пока не могут обеспечить достаточную защиту от контактной коррозии в течение всего срока службы изделия, а некоторые из них сложны в применении и небезопасны [18–20].

В работе [21] по результатам испытаний на контактную коррозию сборных образцов «сталь марки 08X18H10 (с различными покрытиями)–алюминиевый сплав 1440 (Ан.Окс.нхр)» установлено, что высокими защитными свойствами обладают покрытия цинк-никель, олово-цинк и гальванотермическое покрытие.

В данной статье рассматриваются несколько распространенных покрытий сплавами на основе цинка и многослойные гальванотермические покрытия в сравнении с кадмиевым покрытием, а также представлены результаты электрохимических исследований коррозионностойких сталей 08X18H10, 12X18H10T и алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 (с покрытиями и без покрытий).

Материалы и методы

В работе применяли образцы из сталей марок 08X18H10, 12X18H10T и алюминиевых сплавов 1163, 1933, В95:

- для электрохимических исследований – образцы размером 70×30×2 мм;
- для испытаний в камере соляного тумана (КСТ) – образцы из сталей (70×25×2 мм) и алюминиевых сплавов (110×65×2 мм) с отверстиями М8.

Для подготовки, осаждения и наполнения покрытия на образцах из алюминиевых сплавов использовали электролиты в соответствии с ГОСТ 9.305–84 [22]. Анодное окисление образцов из алюминиевых сплавов проводили в растворе H_2SO_4 в течение 30 мин с последующим наполнением покрытия в растворе $K_2Cr_2O_7$ в течение 30 мин. Средняя толщина покрытия Ан.Окс.нхр составила 10 мкм.

Для приготовления растворов и электролитов применяли реактивы марок «хч» или «чда», деионизированную воду с электропроводностью не более 1 мкСм/см.

Обезжиривание образцов из сталей проводили в щелочном растворе при температуре 65 °С в течение 10 мин [22]. В соответствии с ГОСТ 9.402–2004 [23] осуществляли контроль качества обезжиривания.

Активацию поверхности стальных образцов и нанесение никелевого подслоя проводили в соответствии с ГОСТ 9.305–84 [22].

Термообработку образцов с покрытиями осуществляли в воздушной среде в сушильном шкафу: покрытие Ц-Н(85)9 – при температуре 190 °С в течение 2 ч [24], гальванотермическое покрытие – по двухступенчатому режиму.

Электрохимические исследования проводили с помощью потенциостата-гальваностата. Использовали трехэлектродную ячейку объемом 350 мл, позволяющую задавать рабочую (контактную) площадь образца 1 см². Платиновую сетку (2,5×2,5 мм) применяли в качестве вспомогательного электрода, хлорсеребряный электрод (х.с.э.) в насыщенном растворе KCl – в качестве электрода сравнения (потенциал относительно нормального водородного электрода +197 мВ). В качестве рабочего электролита использовали 3%-ный раствор NaCl. Исследование проводили путем измерения потенциала разомкнутой цепи $E_{p,ц}$ и регистрации потенциодинамических кривых: анодных (АПК) и катодных (КПК) поляризационных кривых. Измерение $E_{p,ц}$ образцов осуществляли

в течение 1 ч, принимая за стационарный потенциал $E_{ст}$ конечное значение при условии, что изменение $E_{р.ц}$ за последние 0,5 ч не превышало 30 мВ. Построение АПК и КПК проводили после выдержки в растворе в течение 1 ч. Устанавливали начальное значение потенциалов относительно $E_{ст}$: для АПК – положительнее на 100 мВ, для КПК – отрицательнее на 100 мВ. Использовали скорость развертки потенциала 0,166 мВ/с. Снятие АПК завершали при достижении потенциала +1000 мВ или плотности тока 20 мА/см². Снятие КПК прекращали при достижении потенциала –1000 мВ либо плотности тока 20 мА/см². Перед проведением измерений для удаления продуктов коррозии с поверхности образцов применяли шлифование (для образцов без покрытия) или выдержку при потенциале –1,2 В в течение 2 мин (для образцов с покрытием).

Ввиду высокого сопротивления анодно-оксидного покрытия на сплавах алюминия построение АПК и КПК не представляется возможным и указанный метод не подходит для характеристики подобных покрытий. Поэтому для электрохимической экспресс-оценки защитных свойств таких покрытий применяли метод спектроскопии электрохимического импеданса (СЭИ), суть которого заключается в анализе отклика электрохимической системы «электролит–покрытие–металл», к которой прилагается электрический сигнал (обычно синусоидальной формы) малой амплитуды (несколько десятков мВ) относительно свободного потенциала [21]. Самым простым способом оценки защитных свойств покрытий с использованием метода СЭИ является определение модуля импеданса при частоте 0,1 Гц (импеданс в области низких частот характеризует барьерные свойства покрытия). Исследование с помощью СЭИ проводили в диапазоне частот от 0,01 до 100 кГц (10 точек на одну декаду) посредством приложения синусоидального сигнала с амплитудой 25 мВ.

Пакеты, состоящие из образцов коррозионностойких сталей 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т с электрохимическими покрытиями (сплавом цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр), гальванотермическим (Ц4.04.Ц2.01.т.хр), кадмиевым (Кд9.хр)) и образцов из алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 с Ан.Окс.нхр, для испытаний на контактную коррозию изготавливали в соответствии с ГОСТ 9.909–2023 (тип 2) (рис. 1) [25]. Испытания проводили в КСТ в соответствии с ГОСТ 9.308–85 (метод 1) [26] с непрерывным распылением 5%-ного нейтрального раствора NaCl в течение 2160 ч при температуре 35±2 °С и относительной влажности 95 %. Соотношение площади стального образца к площади образца из алюминиевого сплава составляло 1:4.

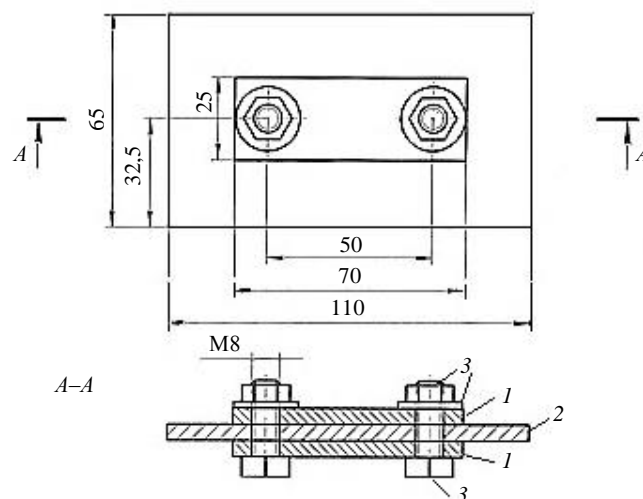


Рис. 1. Схема сборки пакета образцов для коррозионных испытаний: 1 – коррозионностойкая сталь с гальваническим покрытием; 2 – алюминиевый сплав с Ан.Окс.нхр; 3 – полипропиленовые болт, гайка и шайба

Измерение глубины коррозионных поражений на образцах алюминиевых сплавов в местах контакта со стальными образцами проводили с помощью профилометра в трех точках после удаления продуктов коррозии в растворе HNO_3 в соответствии с ГОСТ 9.907–2007 [27].

Результаты и обсуждение

Значения стационарных потенциалов $E_{\text{ст}}$ коррозионностойких сталей 08X18H10 и 12X18H10T (с покрытиями и без покрытий) и алюминиевых сплавов 1163, B95, 1933 в 3%-ном растворе NaCl представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения стационарных потенциалов коррозионностойких сталей и алюминиевых сплавов без покрытий

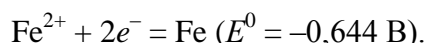
Металл	Стационарный потенциал $E_{\text{ст}} \pm 0,02$, В
Сталь 08X18H10	–0,03
Сталь 12X18H10T	–0,05
Алюминиевый сплав 1163	–0,62
Алюминиевый сплав 1933	–0,68
Алюминиевый сплав B95	–0,67

Таблица 2

Значения стационарных потенциалов коррозионностойких сталей с гальваническими покрытиями

Металл	Покрытие	Стационарный потенциал $E_{\text{ст}} \pm 0,02$, В
Сталь 08X18H10T Сталь 12X18H10T	Ц9.хр	–0,98
	Кд9.хр	–0,72
	Ц-Н(85)9.хр	–0,84
	О-Ц(80)9.хр	–0,88
	Ц4.О2.т.хр	–0,89
	Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр	–0,91

Установлено, что стационарные потенциалы коррозионностойких сталей 08X18H10 и 12X18H10T без покрытий в 3%-ном электролите NaCl имеют наиболее положительные значения: –0,03 и –0,05 В соответственно. Благодаря формированию пассивной пленки на поверхности коррозионностойких сталей в нейтральных средах [28–30], их стационарные потенциалы смещаются в положительную область. Это приводит к тому, что они становятся более электроположительными по сравнению с углеродистыми сталями (со стационарными потенциалами от –0,5 до –0,3 В) и потенциалом, определяемым равновесием Fe(II)/Fe по реакции [31]:



Разница между $E_{\text{ст}}$ исследованных сталей и алюминиевых сплавов составила ~(600–700) мВ, что свидетельствует о склонности этих материалов к контактной коррозии. При этом сталь будет являться катодом, а алюминиевый сплав – анодом, приводя к ускоренному окислению последнего. Этим определяется необходимость использования защитных покрытий при контакте металлов.

Значения $E_{ст}$, полученные для всех исследованных покрытий на сталях, оказались более отрицательными по сравнению со значениями $E_{ст}$ для алюминиевых сплавов, что свидетельствует о том, что при контакте они будут являться анодами и выступать в качестве жертвенного покрытия, защищая тем самым от коррозии сплавы алюминия. Наиболее отрицательные значения $E_{ст}$ в 3%-ном растворе NaCl показывают цинковое покрытие Ц9.хр (–0,98 В) и гальванотермические покрытия Ц4.О2.т.хр (–0,89 В) и Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр (–0,91 В). Наиболее близкие к $E_{ст}$ алюминиевых сплавов значения, а значит, потенциально более низкую склонность к контактной коррозии имеют кадмиевое Кд9.хр (–0,72 В), цинк-никелевое Ц-Н(85)9.хр (–0,84 В) и олово-цинковое О-Ц(80)9.хр (–0,88 В) покрытия.

В табл. 3 представлены значения модуля импеданса при частоте 0,1 Гц покрытий Ан.Окс.нхр на алюминиевых сплавах до и после испытаний в КСТ.

Таблица 3

Значения модуля импеданса при частоте 0,1 Гц покрытий Ан.Окс.нхр на алюминиевых сплавах 1163, 1933, В95 до и после испытаний в камере соляного тумана

Алюминиевый сплав с покрытием Ан.Окс.нхр	Модуль импеданса, МОм/см ²	
	до испытаний	после испытаний (1920 ч)
1163	601,99	40,18
1933	291,76	0,07
В95	1163,10	0,29

Проведенные исследования показали, что анодно-оксидные покрытия обладают высокими защитными свойствами, так как препятствуют переходу электронов между алюминиевым сплавом и другим контактным металлом. Однако со временем происходит значительное уменьшение значения модуля импеданса на несколько порядков, что свидетельствует о снижении защитных свойств за счет выщелачивания наполнения пленки. Следует отметить, что покрытие Ан.Окс.нхр может повреждаться также за счет механического воздействия, приводящего к образованию царапин, трещин, эрозии при взаимном трении с крепежными элементами. В таком случае коррозионные процессы будут активно протекать в местах повреждения анодно-оксидного покрытия, так как площадь катода (стали) будет значительно превышать площадь анода (алюминия). При определенных условиях образующиеся продукты коррозии могут вызывать внутренние напряжения, способствующие трещинообразованию и/или разрушению защитного покрытия, приводя к дальнейшему распространению коррозионного процесса. Наличие анодного покрытия на стали при контакте позволит избежать интенсивной коррозии алюминия в местах повреждения покрытия Ан.Окс.нхр.

Оценку защитных свойств гальванических покрытий на стальных образцах проводили с помощью графического анализа, основанного на построении и интерпретации АПК и КПК.

На рис. 2 изображены АПК и КПК для образцов из алюминиевых сплавов 1163 (а, б), 1933 (в, з), В95 (д, е) и сталей 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т с исследуемыми покрытиями.

На рис. 3 представлено графическое определение потенциала контактной коррозии ($E_{к.к}$) и плотности тока коррозии ($i_{к.к}$) для системы, состоящей из сплава Sn–Zn и алюминиевого сплава 1163. Полученные таким образом значения $E_{к.к}$ и $i_{к.к}$ для исследованных контактных пар представлены в табл. 4.

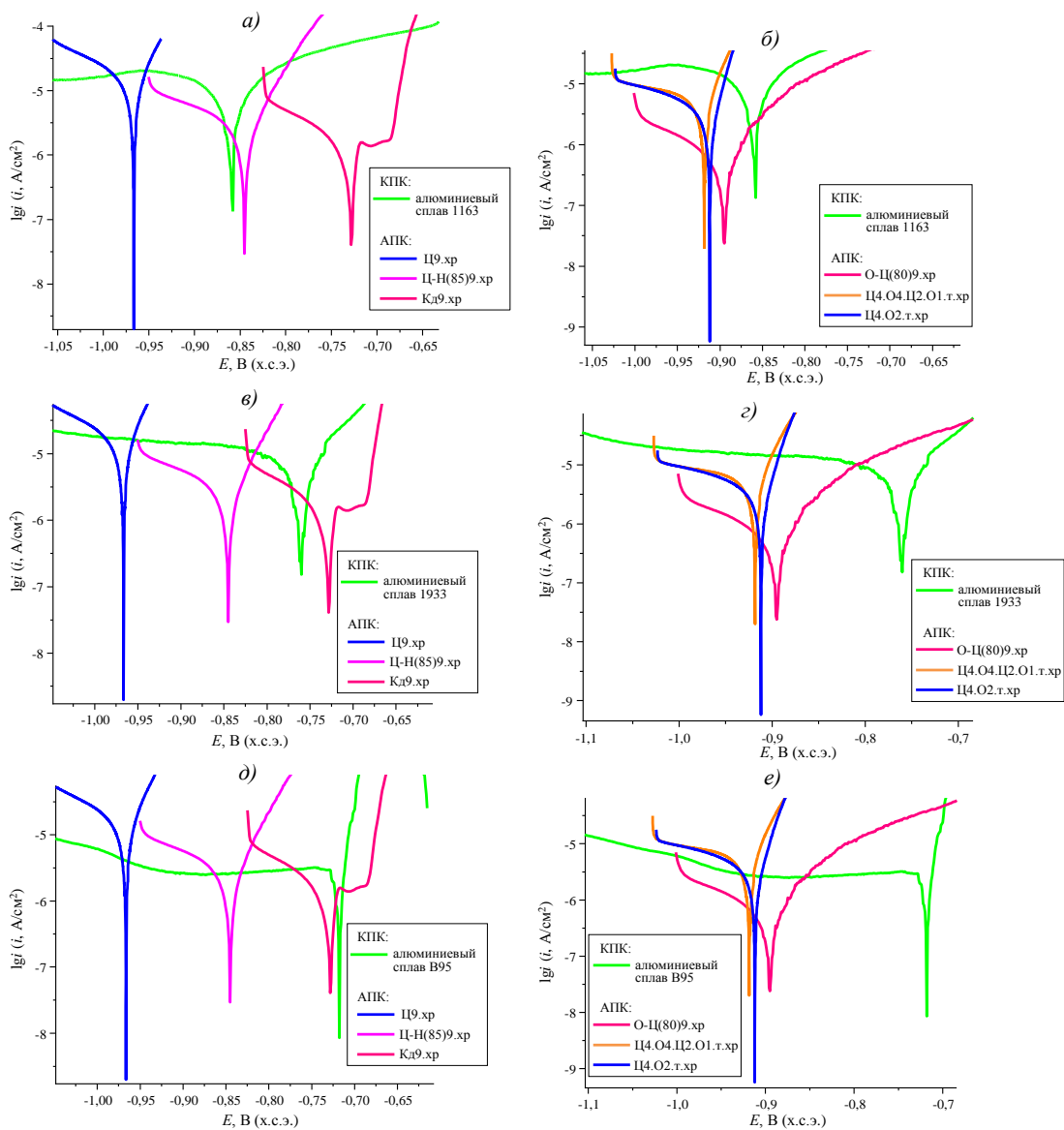


Рис. 2. Анодные (АПК) и катодные (КПК) поляризационные кривые в координатах $\lg i-E$ (х.с.э. – электрод сравнения)

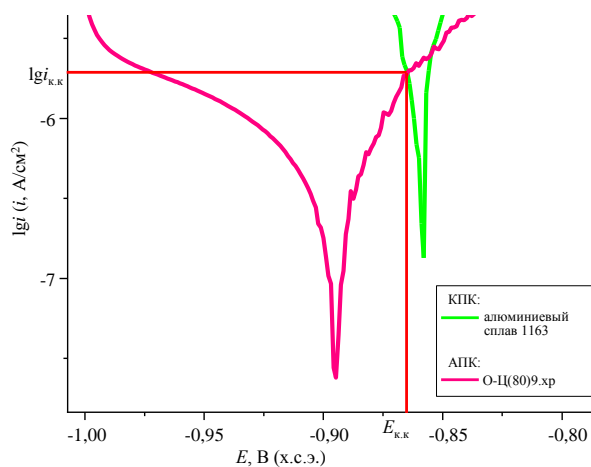


Рис. 3. Определение потенциала контактной коррозии $E_{к.к}$ и плотности тока контактной коррозии $i_{к.к}$ (х.с.э. – электрод сравнения)

Значения потенциала контактной коррозии $E_{к.к}$
и плотности тока контактной коррозии $i_{к.к}$ контактных пар

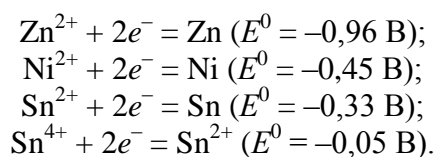
Покрытия на сталях 08X18H10 и 12X18H10T	Значения показателей для алюминиевых сплавов					
	1163		1933		B95	
	$E_{к.к} \pm 0,02$, В	$i_{к.к}$, мкА/см ²	$E_{к.к} \pm 0,02$, В	$i_{к.к}$, мкА/см ²	$E_{к.к} \pm 0,02$, В	$i_{к.к}$, мкА/см ²
Кд9.хр	-0,82	17,0*	-0,75	1,90*	-0,72	0,93
Ц9.хр	-0,95	20,90	-0,96	17,00	-0,96	3,98
Ц-Н(85)9.хр	-0,86	1,74*	-0,81	10,50	-0,83	2,69
О-Ц(80)9.хр	-0,86	1,91	-0,81	10,00	-0,85	2,57
Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр	-0,90	14,10	-0,90	14,80	-0,91	2,70
Ц4.О2.т.хр	-0,89	12,60	-0,89	14,10	-0,91	2,70

* Алюминиевый сплав является анодом.

Согласно полученным данным, большинство рассмотренных покрытий являются анодами по отношению к алюминиевым сплавам. Наиболее близкие значения к потенциалу коррозии $E_{кор}$ алюминиевых сплавов 1933 и B95 среди анодных покрытий имела система Ц-Н(85)9.хр (рис. 2, в, д), в случае со сплавом 1163 их значения $E_{кор}$ практически совпадали (рис. 2, а).

Величина плотности тока в общем случае – это показатель скорости коррозионного процесса, что является следствием закона Фарадея. Согласно полученным данным, наименьшими значениями плотности тока контактной коррозии обладают покрытия цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр), олово-цинк (О-Ц(80)9.хр) и кадмиевое (Кд9.хр) (в контакте со сплавом B95). Однако следует отметить, что в двух других случаях покрытие Кд9.хр в контакте с алюминиевыми сплавами 1163 и 1933 являлось катодом и не подходило в качестве жертвенного покрытия.

Окисление гальванических покрытий происходит по сложному механизму, поэтому в процессе эксплуатации может меняться характер контактной коррозии. На рис. 4 в линейных координатах представлены АПК стальных образцов с покрытиями, на которых видно наличие нескольких пиков анодного окисления, заканчивающихся вторичной пассивацией. При потенциалах >100 мВ наблюдается резкое увеличение плотности тока, в данной области потенциалов происходит полное растворение покрытия согласно справочным данным по реакциям:



Однако при этом растворение подложки наблюдается при более положительных потенциалах (табл. 5). В большинстве случаев полное растворение рассмотренных покрытий осуществляется при более положительных потенциалах, нежели потенциал $E_{ст}$ для алюминиевых сплавов. На АПК гальванотермического покрытия (рис. 4) имеются пики анодного окисления при потенциалах -750, -470 и -280 мВ. Положение пиков указывает на процесс селективного растворения цинка из фаз с различным содержанием данного металла. По мере протекания процесса будет происходить постепенное обезлегирование поверхности по цинку, и потенциал на поверхности покрытия будет смещаться в положительную область, увеличивая защитные свойства покрытия.

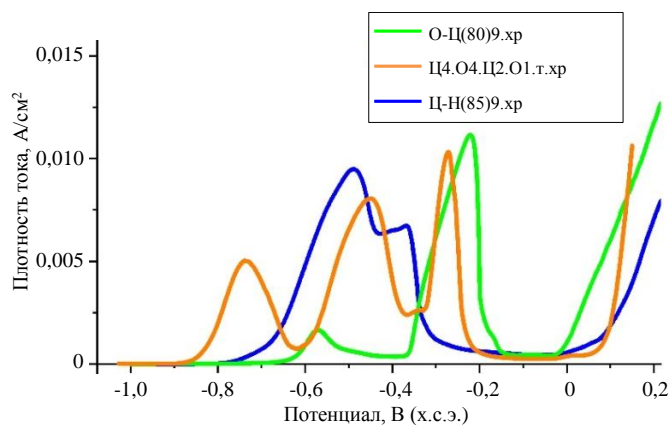


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые в линейных координатах для образцов с покрытиями сплавами олово-цинк, цинк-никель и многослойным гальванотермическим покрытием (х.с.э. – электрод сравнения)

Таблица 5

Значения потенциала перепассивации для сталей 12Х18Н10Т, 08Х18Н10 и гальванических покрытий

Металл	Покрытие	Потенциал перепассивации $E_{пер}$, В
12Х18Н10Т	Без покрытия	0,52
08Х18Н10		0,39
12Х18Н10Т 08Х18Н10	Ц9.xp	0,08
	Кд9.xp	0,05
	Ц-Н(85)9.xp	0,02
	О-Ц(80)9.xp	0,13
	Ц4.О2.т.xp	0,11
	Ц4.О4.Ц2.О1.т.xp	0,09

По результатам проведенных электрохимических исследований для дальнейших испытаний выбраны покрытие сплавом цинк-никель (Ц-Н(85)9.xp) и многослойное гальванотермическое покрытие (Ц4.О4.Ц2.О1.т.xp).



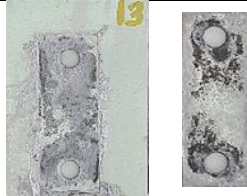


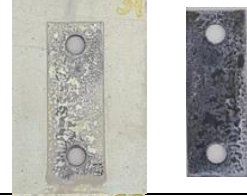


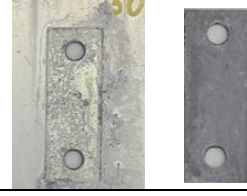
В КСТ проведены испытания пакетов образцов из сталей марок 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т с гальваническими покрытиями и алюминиевых сплавов 1163, В95 и 1933 с покрытием Ан.Окс.нхр. Проведенные испытания в течение 2160 ч показали, что коррозионные поражения на образцах из сталей марок 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т отсутствуют, определены значения глубины коррозионных поражений алюминиевых сплавов с анодно-оксидным покрытием в местах контакта со сталью (табл. 6 и 7).

Таблица 6

Результаты осмотра пакетов образцов из коррозионностойких сталей с гальваническими покрытиями и алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 с покрытием Ан.Окс.нхр в процессе и после испытаний в течение 2160 ч на контактную коррозию в камере соляного тумана

Сталь	Гальваническое покрытие	Время до появления продуктов коррозии покрытия на стали, сут	Глубина коррозионных поражений алюминиевых сплавов с покрытием Ан.Окс.нхр после 2160 ч испытаний (среднее значение), мкм		
			1163	В95	1933
08Х18Н10	Кд9.xp	8	51,5	69,5	41,9
	Ц-Н(85)9.xp	1	16,0	17,6	14,9
	Ц4.О4.Ц2.О1.т.xp	4	17,5	18,3	16,3
12Х18Н10Т	Кд9.xp	8	88,7	94,8	81,1
	Ц-Н(85)9.xp	1	13,5	18,8	11,5
	Ц4.О4.Ц2.О1.т.xp	4	20,8	19,9	21,5

Внешний вид сборочных пакетов образцов из стали 08X18H10 с покрытием сплавом В95 (Ан.Окс.нхр) до и после проведения ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана в течение 2160 ч

Сборочный образец (пакет)	До испытаний (в исходном состоянии)	После испытаний	
		в сборе	в разобранном виде
08X18H10 (Кд9.хр) + В95 (Ан.Окс.нхр)			
08X18H10 (Ц-Н(85)9.хр) + В95 (Ан.Окс.нхр)			
08X18H10 (Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр) + В95 (Ан.Окс.нхр)			

Установлено, что на кадмиевом покрытии через 1 сут испытаний обесцветилась желтая хроматная пленка, а первые продукты коррозии покрытия появились через 8 сут. Первые продукты коррозии покрытия сплавом цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр) появились через 1 сут, на гальванотермическом покрытии системы цинк-олово (Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр) – через 4 сут. Таким образом, многослойное гальванотермическое покрытие системы цинк-олово обладает большей коррозионной стойкостью по сравнению с покрытием цинк-никель, однако менее всего подвержены коррозии алюминиевые сплавы, находящиеся в контакте с покрытием цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр). Полученные результаты также подтверждаются проведенными электрохимическими исследованиями защитной способности покрытий, которые показали, что наименьшим образом контактной коррозии подвержено покрытие цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр).

Заключения

Проведенные электрохимические исследования покрытий и образцов из алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 с покрытием Ан.Окс.нхр показали, что:

- значения стационарных потенциалов образцов из нержавеющей сталей 12X18H10Т и 08X18H10 в 3%-ном растворе NaCl имеют наиболее положительные значения – от $-0,05$ до $-0,03$ В;

- наиболее близкие к стационарным потенциалам алюминиевых сплавов значения в 3%-ном растворе NaCl, а значит, потенциально более низкую склонность к контактной коррозии имели кадмиевое (Кд9.хр), цинк-никелевое (Ц-Н(85)9.хр) и оловоцинковое (О-Ц(80)9.хр) покрытия.

Проведено исследование защитных свойств покрытий на алюминиевых сплавах методом импедансной спектроскопии. Установлено, что:

- со временем происходит снижение защитных свойств покрытий из-за выщелачивания наполнения покрытий;

- самыми высокими защитными свойствами после испытаний в КСТ в течение 1920 ч обладало покрытие Ан.Окс.нхр, сформированное на алюминиевом сплаве 1163.

Проведенный анализ анодных и катодных поляризационных кривых показал, что в наименьшей степени контактной коррозии подвержены покрытия цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр) и олово-цинк (О-Ц(80)9.хр). Вместе с тем многокомпонентные гальванотермические покрытия (Ц4.О2.т.хр, Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр) могут уменьшать свою склонность к контактной коррозии за счет селективного выщелачивания цинка и, как следствие, смещения потенциала коррозии в положительную область.

По результатам ускоренных коррозионных испытаний в КСТ пакетов образцов из нержавеющей сталей 08Х18Н10 и 12Х18Н10Т с исследуемыми электрохимическими покрытиями и образцов из алюминиевых сплавов 1163, В95, 1933 с покрытием Ан.Окс.нхр установлено, что гальванотермическое покрытие Ц4.О4.Ц2.О1.т.хр и покрытие сплавом цинк-никель (Ц-Н(85)9.хр) обладают высокими защитными свойствами: после выдержки в КСТ в течение 2160 ч (3 мес.) отсутствуют продукты коррозии стали. Менее всего подвержены коррозии алюминиевые сплавы, находящиеся в контакте с цинк-никелевым покрытием (Ц-Н(85)9.хр).

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

Список источников

1. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Исламов Р.С. Интерметаллическое соединение Ti_2AlNb – перспективный материал для авиационной и космической техники. Часть 1. Кристаллическая структура и фазовые превращения // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-42-61.
2. Пескова А.В., Сухов Д.И., Мазалов П.Б. Исследование формирования структуры материала титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивных технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (85). С. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
3. 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.
4. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-195-211.
5. Peng Y., Zhao J., Liu Y. et al. Galvanic corrosion between Al–Zn–Mg–Cu alloy and stainless steel in the salt-spray atmosphere // *Materials Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 294. Art. 127009. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.127009.
6. Вахромов Р.О., Ткаченко Е.А., Попова О.И., Милевская Т.В. Обобщение опыта применения и оптимизация технологии изготовления полуфабрикатов из высокопрочного алюминиевого сплава 1933 для силовых конструкций современной авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № 2. С. 34–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-34-39.
7. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
8. Ruiz A.G., Jimenez-Gonzalez E., Canoc E. et al. The corrosion products in a carbon steel/aluminum alloy galvanic couple under thin electrolyte films: An efficient model // *Electrochemistry Communications*. 2019. Vol. 104. Art. 106485. DOI: 10.1016/j.elecom.2019.106485.
9. Matzdorf C.A., Nickerson W.C., Rincon Tronconis B.C. et al. Galvanic Test Panels for Accelerated Corrosion Testing of Coated Al Alloys: Part 1 – Concept // *Corrosion*. 2013. Vol. 69. Is. 12. P. 1240–1246.
10. 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.
11. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1970. 448 с.
12. ASTM STP 576. Galvanic and Pitting Corrosion – Field and Laboratory Studies. American Society for Testing and Materials, 1974. P. 5–19.

13. Kucera V., Mattson E. Atmospheric Corrosion of Bimetallic Structures // Atmospheric Corrosion. Wiley & Sons, 1982. P. 561–574.
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. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Закирова Л.И., Вдовин А.И. Сравнительная оценка защитной способности гальванотермического покрытия системы цинк-олово и кадмиевого покрытия в среде хлоридов // Коррозия: материалы, защита. 2020. № 5. С. 21–29. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-5-21-29.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Enders B., Knau B.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.
20. Jianming X., Weijianga Z., Wolf G.K. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on SK45 steel deposited by IBAD // Surface and Coatings Technology. 2004. Vol. 187. P. 194–198.
21. 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> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53.
22. 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.
23. ГОСТ 9.402–2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. М.: Стандартинформ, 2006. 43 с.
24. ГОСТ 9.302–88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 2001. 40 с.
25. ГОСТ 9.909–2023. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические, металлы и сплавы. Методы испытаний на климатических испытательных станциях. М.: РСТ, 2023. 12 с.
26. ГОСТ 9.308–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных коррозионных испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1990. 21 с.
27. ГОСТ Р 9.907–2007. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. М.: Стандартинформ, 2007. 19 с.
28. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Metallurgia, 1976. 472 с.
29. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 592 с.
30. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р., Горбовец М.А. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 2. Образование пассивных пленок и сероводородное растрескивание сталей // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.
31. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Козлов И.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяном соединении, используемом в конструкции двигателей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 03.07.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

References

1. Nochovnaya N.A., Ivanov V.I., Alekseyev E.B., Islamov R.S. Intermetallic compound Ti_2AlNb – promising material for aviation and space technology. Part 1. Crystal structure and phase transformations. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 03, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-42-61.
2. Peskova A.V., Sukhov D.I., Mazalov P.B. Examination of the formation of the titanium alloy VT6 structure obtained by additive manufacturing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 38–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-38-44.
3. Illarionov E.I., Kolobnev N.I., Gorbunov P.Z., Kablov E.N. *Aluminum alloys in aerospace engineering*. Gen. ed. E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2001, 192 p.
4. Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu., Romanenko V.A. Modern aluminum and aluminum-lithium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
5. Peng Y., Zhao J., Liu Y. et al. Galvanic corrosion between Al–Zn–Mg–Cu alloy and stainless steel in the salt-spray atmosphere. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, vol. 294, art. 127009. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2022.127009.
6. Vahromov R.O., Tkachenko E.A., Popova O.I., Milevskaya T.V. Summarizing of the experience of usage and optimization of manufacturing technology semi-fished product of high strength aluminum alloy 1933 for the primary structures of modern aircraft. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 34–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-34-39.
7. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
8. Ruiz A.G., Jimenez-Gonzalez E., Canoc E. et al. The corrosion products in a carbon steel/aluminum alloy galvanic couple under thin electrolyte films: An efficient model. *Electrochemistry Communications*, 2019, vol. 104, art. 106485. DOI: 10/1016/j.elecom.106485.
9. Matzdorf C.A., Nickerson W.C., Rincon Tronconis B.C. et al. Galvanic Test Panels for Accelerated Corrosion Testing of Coated Al Alloys: Part 1 – Concept. *Corrosion*, 2013, vol. 69, is. 12, pp. 1240–1246.
10. State Standard 9.005–72. *Unified system of protection against corrosion and aging. Metals, alloys, metallic and non-metallic inorganic coatings. Permissible and impermissible contacts with metals and non-metals*. Moscow: Standartinform, 2008, 28 p.
11. Rosenfeld I.L. *Corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1970, 448 p.
12. ASTM STP 576. *Galvanic and Pitting Corrosion – Field and Laboratory Studies*. American Society For Testing And Materials, 1974, pp. 5–19.
13. Kucera V., Mattson E. Atmospheric Corrosion of bimetallic Structures. *Atmospheric Corrosion*. Wiley & Sons, 1982, pp. 561–574.
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. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Zakirova L.I., Vdovin A.I. Comparative assessment of the protective ability of a galvanothermic coating of the zinc-tin system and a cadmium coating in a chloride environment. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2020, no. 5, pp. 21–29. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-5-21-29.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. Enders B., Knau B.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.
20. Jianming X., Weijianga Z., Wolf G.K. The corrosion properties of Al/Al₂O₃ multilayered coatings on CK45 steel deposited by IBA. *Surface and Coatings Technology*, 2004, vol. 187, pp. 194–198.
21. 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> (accessed: July 03, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-9-42-53.
22. State Standard 9.305–84. *Unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings. Operations of technological processes for obtaining coatings*. Moscow: Publ. House of Standards, 2003, 105 p.
23. 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.
24. State Standard 9.302–88. *Unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings. Control methods*. Moscow: Publ. House of Standards, 2001, 40 p.
25. State Standard 9.909–2023. *Unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings, metals and alloys. Test methods at climatic test stations*. Moscow: RST, 2023, 12 p.
26. State Standard 9.308–85. *Unified system of corrosion and aging protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings. Accelerated corrosion testing methods*. Moscow: Publ. House of Standards, 1990, 21 p.
27. State Standard R 9.907–2007. *Unified system of corrosion and aging protection. Metals, alloys, metallic coatings. Methods of removing corrosion products after corrosion testing*. Moscow: Standartinform, 2007, 19 p.
28. Zhuk N.P. *Course in the theory of corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgiya, 1976, 472 p.
29. Tomashov N.D. *Theory of corrosion and protection of metals*. Moscow: Publ. House of the USSR Academy of Sciences, 1959, 592 p.
30. Laptsev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R., Gorbovets M.A. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 2. Formation of passive films and hydrogen sulfide cracking of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 03, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-138-146.
31. 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 03, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.

Информация об авторах

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

Сибилева Светлана Владимировна, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вдовин Александр Ильич, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Кольцова Марина Александровна, начальник лаборатории, 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, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Alexander I. Vdovin, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Marina A. Koltsova, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 08.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.08.2025.

The article was submitted 08.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 12.08.2025.