

Научная статья

УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-96-104

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СПЛАВА 1163-АТ С ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫМИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ В КОНТАКТЕ С УГЛЕПЛАСТИКОМ ВКУ-39/ВТкУ-2.200

М.А. Фомина¹, С.В. Заварзин¹, С.А. Демин¹

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

Аннотация. Применение в конструкции летательных аппаратов деталей, изготовленных из полимерных композиционных материалов, ставит дополнительные задачи по предотвращению контактной коррозии. Полимерные композиционные материалы значительно отличаются по электрохимическим свойствам от металлических материалов, используемых в конструкции планера. Исследовано коррозионное поведение электропроводных металлических покрытий в контакте с углепластиком методом построения анодных и катодных поляризационных кривых. Приведены результаты коррозионных испытаний крепежных элементов с защитными покрытиями в камере солевого тумана и камере тепла и влаги.

Ключевые слова: ускоренные коррозионные испытания, контактная коррозия, композиционные материалы, защитные покрытия, алюминиевые сплавы, электрохимические исследования

Для цитирования: Фомина М.А., Заварзин С.В., Демин С.А. Исследование коррозионной стойкости алюминиевых образцов из сплава 1163-АТ с электропроводными гальваническими покрытиями в контакте с углепластиком ВКУ-39/ВТкУ-2.200 // Труды ВИАМ. 2023. № 10 (128). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-96-104.

Scientific article

STUDY OF THE CORROSION RESISTANCE OF ALUMINUM SPECIMENS FROM 1163-AT ALLOY WITH CONDUCTIVE ELECTROPLATED COATINGS IN CONTACT WITH VKU-39/VTKU-2.200 CARBON FIBER

M.A. Fomina¹, S.V. Zavarzin¹, S.A. Demin¹

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 use of parts made of polymer composite materials in the design of aircraft poses additional challenges to prevent contact corrosion. Polymer composite materials differ significantly in electrochemical properties from metal materials used in airframe construction. The article presents studies of the corrosion behavior of electrically conductive metal coatings in contact with carbon fibers by the method of constructing anodic and cathodic polarization curves, as well as the results of corrosion testing of fasteners with protective coatings in a salt fog chamber.

Keywords: accelerated corrosion tests, contact corrosion, composite materials, protective coatings, aluminum alloys, electrochemical studies

For citation: Fomina M.A., Zavarzin S.V., Demin S.A. Study of the corrosion resistance of aluminum specimens from 1163-AT alloy with conductive electroplated coatings in contact with VKU-39/VTKU-2.200 carbon fiber. *Trudy VIAM*, 2023, no. 10 (128), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-10-96-104.

Введение

К качеству поверхности деталей современной авиационной техники предъявляются особые требования, в частности для защиты самолета от электростатического заряда и электрических разрядов, которые могут возникать во время полета [1–3]. Электростатический заряд может привести к накоплению зарядов на поверхности самолета, которые могут притягивать к себе пыль и другие частицы из воздуха. Кроме того, электрические разряды могут вызывать коррозию материалов и покрытий авиационной техники, что приводит к снижению работоспособности, уменьшению долговечности, возникновению разрушений, отказов, аварий и катастроф [4–7]. Интенсивное развитие коррозии в зонах соединения металлических и неметаллических деталей и сборочных единиц вызывает значительное сокращение межремонтных и календарных сроков эксплуатации авиационной техники, существенно увеличивает затраты на ремонт [8, 9]. Электрический заряд накапливается за счет переноса электронов между фюзеляжем и воздушными массами, особенно с примесями пылевидных частиц или песка, и может приводить к созданию помех радиоэлектронного оборудования, средств навигации и отказу электроники летательных аппаратов. В связи с этим системы защиты самолета от электричества важны для обеспечения безопасности полетов [10–12].

Применение специальных материалов и приемов при изготовлении конструкций летательных аппаратов (особенно элементов фюзеляжа) позволяет существенно снизить накопление электростатического заряда на поверхности, возникающего в момент движения при трении о воздух или при прохождении в электростатическом поле, например в грозовом облаке.

Существуют специальные требования по металлизации следующих элементов конструкции и агрегатов современных летательных аппаратов: металлические части площадью более 0,2 м² или длиной более 0,5 м, составные части, подвижные и складывающиеся конструкции, трубопроводы, электрооборудование. Наиболее часто металлизацию корпуса летального аппарата, изготовленного из композиционных материалов, проводят крепежными (заклепками, болтами), установочными деталями (хомутами, колodками) или гибкими (перемычками, лентами металлизации) соединениями. Материалы контактирующих поверхностей элементов, соединенных с целью металлизации, должны составлять допустимые по электрохимическому потенциалу контактные пары [13].

Для наиболее эффективной защиты самолета от электричества необходимо учитывать все факторы и условия эксплуатации воздушного судна, а также природу применяемых материалов. Защита самолета должна основываться на комплексном подходе, включающем установку антистатических полос, молниеотводов и системы разрядки статического электричества [14].

Одним из способов разрядки статического электричества с фюзеляжа летательных аппаратов является применение крепежных элементов, отводящих заряд на системы разрядки статического электричества. Для эффективной и продолжительной работы необходимо, чтобы крепежный элемент обладал высокими значениями электропроводности и сохранял их в течение длительного периода эксплуатации. Для обеспечения электропроводности и защиты от коррозии деталей и поверхностей конструкции планера используют 10 % от общего количества алюминиевого крепежа без защитного покрытия, что приводит к возникновению коррозии и частым ремонтам. Алюминиевые сплавы, применяемые для изготовления крепежных элементов, характеризуются высокими

значениями электропроводности, однако за время эксплуатации она снижается из-за образования плотных оксидных пленок или продуктов коррозии. Коррозия в этом процессе имеет основное значение и значительно ускоряется при контакте алюминия с неметаллическими материалами, в частности с углепластиками [15]. Одним из методов обеспечения защиты крепежных элементов, изготовленных из алюминиевых сплавов, может служить нанесение комбинированных многослойных гальванических покрытий. В связи с этим разработка технологии нанесения электропроводного защитного покрытия для крепежей из алюминиевых сплавов, эксплуатируемых в контакте с углепластиками, является актуальной задачей.

Цель данной работы заключалась в разработке способа повышения коррозионной стойкости крепежных элементов из алюминиевых сплавов путем нанесения систем многослойных гальванических покрытий, обладающих повышенной коррозионной стойкостью.

Материалы и методы

Электрическое сопротивление измеряли с помощью цифрового мультиметра. С учетом полученных значений рассчитывали электропроводность.

Электрохимические исследования проводили в трехэлектродной электрохимической ячейке объемом 350 см³. Рабочая площадь образца в ячейке составляла 1 см². В качестве вспомогательного электрода использовали платиновую сетку; в качестве электрода сравнения – хлорсеребряный электрод в насыщенном растворе KCl, потенциал которого в этой среде относительно нормального водородного электрода (НВЭ) составляет 197 мВ; в качестве электролита – 3%-ный водный раствор NaCl.

Защитную способность покрытий оценивали в соответствии с ГОСТ 9.308–85 путем экспозиции образцов в течение 200 ч в камере солевого тумана с непрерывным распылением 5%-ного раствора хлористого натрия (метод 1) и в камере тепла и влаги при температуре 40±2 °С и относительной влажности 93±3 % (метод 6).

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

Результаты и обсуждение

Для определения влияния электростатического заряда и электрических разрядов на детали и поверхности летательных аппаратов измеряли электрическое сопротивление. Электропроводность G рассчитывали по формуле

$$G = 1/R,$$

где R – электрическое сопротивление, мкОм·м.

Электропроводность всех исследованных гальванических покрытий превышает электропроводность образца из алюминиевого сплава 1163-АТ без покрытия (табл. 1).

Проведены ускоренные коррозионные испытания для определения совместимости контактов разнородных в электрохимическом отношении материалов – образцов алюминиевого сплава 1163-АТ с гальваническими покрытиями (кадмиевое Кд20.хр, многослойное системы «никель–медь–никель» Н20.М20.Н20, гальванотермическое системы «цинк–олово–цинк» Ц4.О4.Ц2т) и углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200. Внешний вид образцов из сплава 1163-АТ с нанесенными электропроводными гальваническими покрытиями после выдержки в камере солевого тумана и камере тепла и влаги в течение 200 ч представлен на рис. 1.

Таблица 1

Электропроводность поверхности алюминиевого сплава 1163-АТ с гальваническими покрытиями

Покрытие	Электрическое сопротивление, мкОм·м	Электропроводность, (мкОм·м) ⁻¹
Сплав 1163-АТ без покрытия	$\frac{0,1-0,12}{0,11}$	$\frac{8,3-10,0}{9,2}$
Кадмиевое (Кд20.хр)	$\frac{0,06-0,08}{0,07}$	$\frac{12,5-16,7}{14,6}$
Многослойные системы «никель–медь–никель» (Н20.М20.Н20)	$\frac{0,04-0,06}{0,05}$	$\frac{16,7-25,0}{20,8}$
Гальванотермическое системы «цинк–олово–цинк» (Ц4.О4.Ц2т)	$\frac{0,04-0,06}{0,05}$	$\frac{16,7-25,0}{20,8}$

Примечание. В числителе указан диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

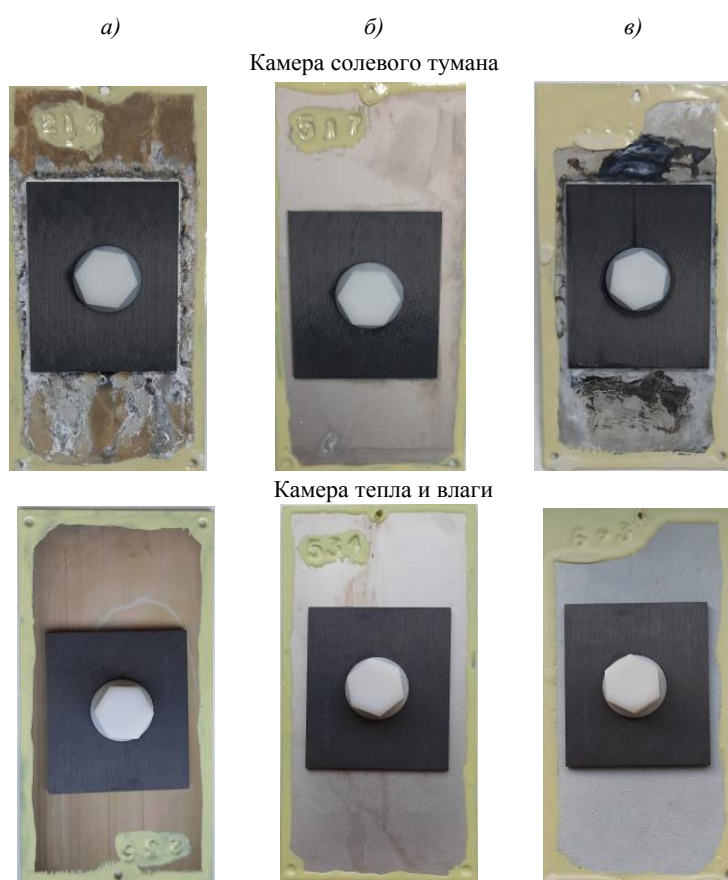


Рис. 1. Внешний вид конструктивно-подобных образцов из алюминия с различными гальваническими покрытиями после коррозионных испытаний в камере солевого тумана и камере тепла и влаги в течение 200 ч: а – кадмиевое покрытие; б – многослойное покрытие системы «никель–медь–никель»; в – гальванотермическое покрытие системы «цинк–олово–цинк»

Подложки из сплава 1163-АТ с кадмиевым и гальванотермическим покрытием, контактирующие с углепластиком ВКУ-39/ВТКУ-2.200, подвержены коррозионному поражению. На образцах с многослойным покрытием системы «никель–медь–никель» (Н20.М20.Н20) за время экспозиции в камере солевого тумана никелевый слой частично растворился, защитив при этом более электроположительный медный подслои по анодному механизму, коррозионные поражения подложки из сплава 1163-АТ не выявлены.

Для изучения влияния контактной коррозии образцов из алюминиевого сплава 1163-АТ с гальваническими покрытиями в контакте с углепластиком ВКУ-39/ВТкУ-2.200 использовали графический метод анализа анодных (АПК) и катодных (КПК) поляризационных кривых. Кривые регистрировали после выдержки образцов в растворе в течение 4 ч с замером величины потенциала разомкнутой цепи $E_{р.ц}$, принимая за стационарный потенциал $E_{ст}$ конечное значение $E_{р.ц}$ при условии, что его изменение за последние 0,5 ч не превышает 30 мВ. Начальное значение потенциалов устанавливали для АПК на 100 мВ положительнее значения $E_{ст}$, для КПК – на 100 мВ отрицательнее. Скорость развертки потенциала составила 0,16 мВ/с. Регистрацию кривых останавливали при достижении плотности тока $2 \cdot 10^{-3}$ А/см² либо потенциала 500 и 1000 мВ для АПК и КПК соответственно. С целью удаления продуктов коррозии перед измерением образцы без покрытия подвергали шлифовке, образцы с покрытием выдерживали при потенциале от –500 до –700 мВ относительно значения $E_{ст}$ в течение 2 мин.

На рис. 2, а представлены экспериментальные данные по измерению поляризационных кривых для образцов из сплава 1163-АТ с различными покрытиями (АПК) и углепластика (КПК). Значения потенциала $E_{к.к}$ и плотности тока $i_{к.к}$ контактной коррозии рассмотренных контактных пар представлены в табл. 2. Величины скорости контактной коррозии рассчитаны на основе уравнений (1)–(4) и предполагаемого соотношения площадей 1:1.

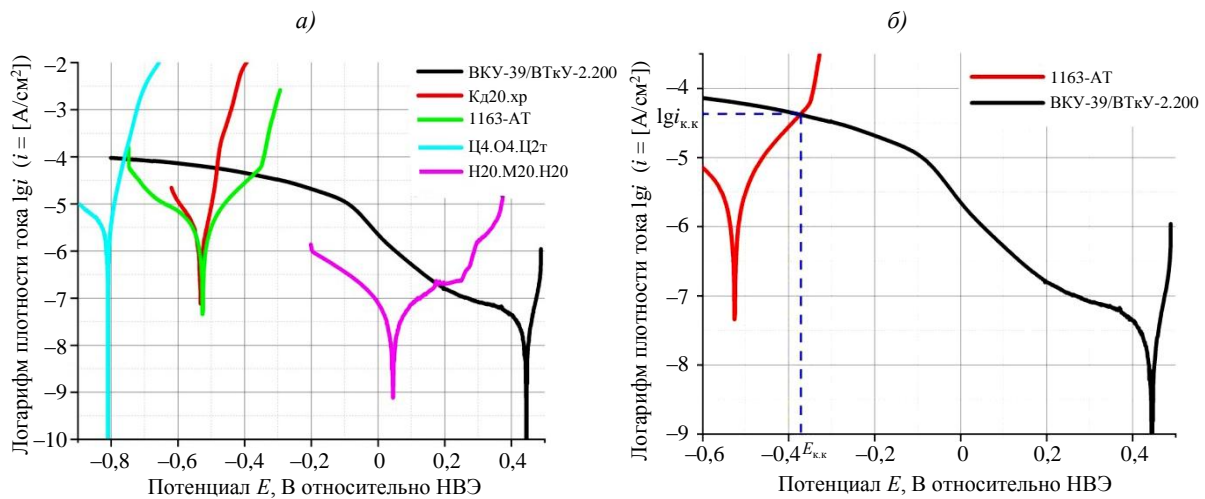
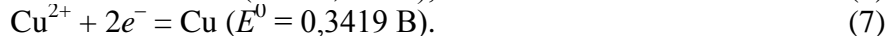
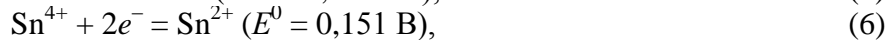
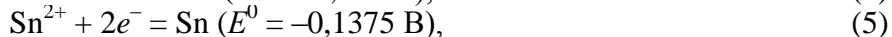
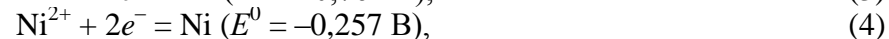
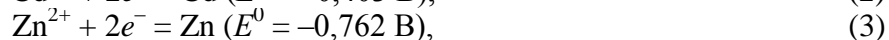


Рис. 2. Поляризационные кривые: а – образцы из сплава 1163-АТ с различными покрытиями (анодные) и углепластика (катодные); б – расчет потенциала $E_{к.к}$ и плотности тока $i_{к.к}$ контактной коррозии на примере системы «алюминий–углепластик». Синей пунктирной линией показано определение величин $E_{к.к}$ и $i_{к.к}$ (НВЭ – нормальный водородный электрод)

Таблица 2

Коррозионные характеристики контактных пар

Покрытие, контактирующее с углепластиком ВКУ-39/ВТкУ-2.200	Потенциал контактной коррозии $E_{к.к}$, мВ	Плотность тока контактной коррозии $i_{к.к}$, А/см ²	Скорость контактной коррозии $v_{к.к}$, г/(м ² ·ч)
Сплав 1163-АТ без покрытия	-370±20	$(4,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$	0,14
Кадмиевое (Кд20.хр)	-480±20	$(5,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$	1,20
Гальванотермическое системы «цинк-олово-цинк» (Ц4.О4.Ц2т)	-760±20	$(9,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$	1,10
Многослойное системы «никель-медь-никель» (Н20.М20.Н20)	180±30	$(2,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-7}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$



Все изученные системы подвержены контактной коррозии, разница между потенциалами коррозии ($E_{\text{кор}}$) АПК и КПК превышала 400 мВ. В наименьшей степени контактной коррозии подвержен образец с многослойным покрытием Н20.М20.Н20.

Детальное рассмотрение АПК в линейных координатах (рис. 3) свидетельствует о наличии на анодной части кривой либо области пассивности, при которой плотность тока не превышает 1 мА/см², либо пиков анодного окисления, заканчивающегося вторичной пассивацией поверхности. При достижении определенного потенциала плотность тока резко увеличивалась, что соответствует процессу полного анодного растворения покрытия/сплава. Значения потенциала перепассивации $E_{\text{пер}}$, полученные путем экстраполяции линейного участка увеличения плотности тока на нулевое значение, во всех случаях оказались более положительными, чем значение $E_{\text{к.к}}$, что объясняет относительно невысокие скорости контактной коррозии. Для образца сплава 1163-АТ с покрытием Кд20.хр значения $E_{\text{к.к}}$ и $E_{\text{пер}}$ оказались близки. Это свидетельствует о том, что контакт с углепластиком ВКУ-39/ВТКУ-2.200 будет приводить к его ускоренному окислению по механизму контактной коррозии. При этом скорость коррозии будет зависеть от соотношения контактных площадей. Увеличение площади катода по отношению к аноду в 3–5 раз приводит к практически пропорциональному росту величины $i_{\text{к.к}}$.

Следует отметить, что механизм окисления многослойных покрытий достаточно сложный, в результате чего характер контактной коррозии со временем может меняться. На рис. 3, в представлена АПК образцов с многослойным покрытием Ц4.О4.Ц2т в линейных координатах. На графике присутствуют серии пиков анодного окисления при потенциалах приблизительно –620, –430, –250 и –100 мВ относительно НВЭ. Природа данных пиков неясна: они могут соответствовать высшей степени окисления либо окислению фаз цинк–олово с различным обогащением цинком. Тем не менее вышеуказанные процессы заканчиваются вторичной пассивацией покрытия. В области потенциалов, положительнее 400 мВ относительно НВЭ, на кривой АПК наблюдается резкое увеличение плотности тока, соответствующее перепассивации поверхности. В данной области потенциалов происходят окисление олова по реакциям (5) и (6) и, как следствие, полное растворение покрытия. Полученное значение потенциала перепассивации $E_{\text{пер}}$ практически совпадает с потенциалом коррозии углепластика. Можно сделать вывод, что полное разрушение покрытия вследствие контактной коррозии маловероятно, однако будет происходить постепенное обезлегиrowание поверхности по цинку.

При измерении потенциала разомкнутой цепи образца с многослойным покрытием Н20.М20.Н20 в течение 1–2 ч кривые в нескольких точках выходили на плато в области потенциалов $E_{\text{ст}} = 130 \pm 10$ мВ. Однако при регистрации АПК по методике, описанной ранее, отсутствовал катодный участок кривой. Это может свидетельствовать о том, что за время регистрации (4 ч) система так и не перешла к истинному равновесию, либо о том, что в хлорсодержащих электролитах покрытие Н20.М20.Н20 находится в активном состоянии. В результате решено начинать регистрацию АПК с более отрицательных потенциалов. Полученное значение потенциала нулевого тока $E_{\text{кор}}$ оказалось почти на 100 мВ более отрицательным по сравнению со значением $E_{\text{ст}}$. В отличие от покрытия Ц4.О4.Ц2т для покрытия Н20.М20.Н20 ярко выраженные пики анодного окисления не характерны, но наблюдается достаточно широкая область пассивности (рис. 3, г), которая заканчивается перепассивацией при потенциалах >360 мВ относительно НВЭ. По-видимому, лимитирующей стадией является окисление меди по реакции (7).

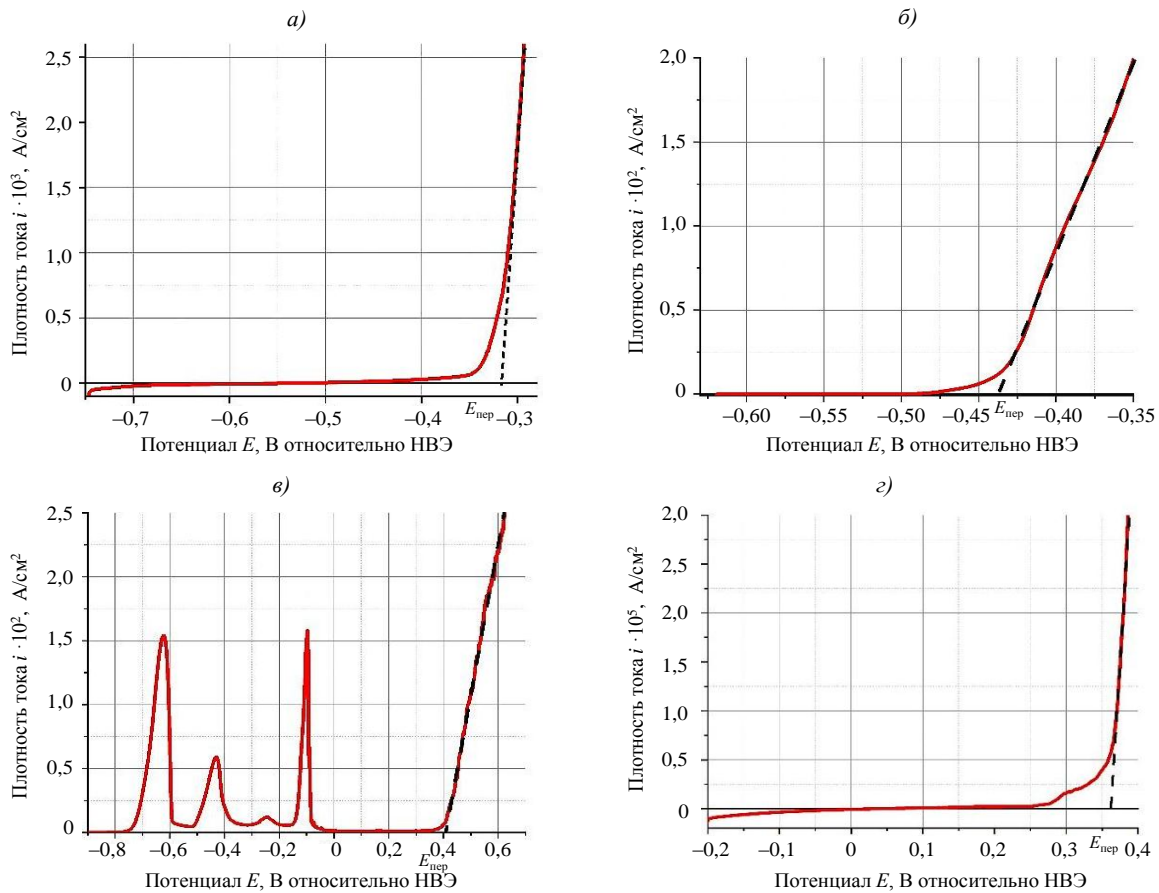


Рис. 3. Анодные поляризационные кривые образцов сплава 1163-АТ без покрытия (а) и с покрытиями Кд20.хр (б), Ц4.О4.Ц2т (в), Н20.М20.Н20 (г). Синей пунктирной линией показано определение потенциала перепассивации $E_{\text{пер}}$

Полученные данные могут свидетельствовать о наличии контактной пары никель–медь вследствие пористости верхнего слоя, что приводит к окислению никеля по механизму электрохимической коррозии. В таком случае электрохимические данные, полученные в области потенциала $E_{\text{к,к}}$, представляют собой суперпозицию катодных и анодных процессов, характерных для меди и никеля соответственно, в результате чего реальная величина скорости окисления верхнего никелевого слоя может быть больше рассчитанной графическим методом. Полученная величина $E_{\text{пер}}$ и потенциал пары Cu(II)/Cu , сравнимые со значением $E_{\text{кор}}$ для углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200, свидетельствуют о том, что полное разрушение покрытия вследствие контактной коррозии маловероятно.

Заключения

Электропроводность всех исследованных гальванических покрытий превышает электропроводность образца из алюминиевого сплава 1163-АТ без покрытия, что можно объяснить образованием плотной пленки оксидов на поверхности алюминиевого сплава. Наибольшими значениями электропроводности обладают покрытия системы «цинк–олово–цинк» и «никель–медь–никель».

Исследования коррозионной стойкости образцов из сплава 1163-АТ с электропроводными гальваническими покрытиями показали, что за время ускоренных коррозионных испытаний подложка в контакте с углепластиком ВКУ-39/ВТкУ-2.200 подверглась коррозионному поражению на образцах с кадмиевым покрытием и гальванотермическим покрытием системы «цинк–олово–цинк». На образцах с многослойным

покрытием системы «никель–медь–никель» никелевый слой частично растворился, однако коррозионные поражения подложки не выявлены.

В наименьшей степени контактной коррозии подвержены образцы с многослойным покрытием системы «никель–медь–никель». Величина потенциала перепассивации свидетельствует о том, что разрушение данного покрытия вследствие контактной коррозии маловероятно.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 4 (37). С. 38–52. DOI: 10/18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
5. Каблов Е.Н. Инновационное развитие – важнейший приоритет государства // *Металлы Евразии*. 2010. № 2. С. 6–11.
6. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
7. Садков В.В., Миркин И.И. Обеспечение коррозионной стойкости алюминиевых конструкций в самолетах ТУ // *Цветные металлы*. 2006. № 11. С. 73–76.
8. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2013. № 187. С. 83–91.
9. Agarwala V.S. Aircraft corrosion and aging: problems and controls // *Proceedings of 15th ICC. Granada, Spain*. 2002. P. 3–12.
10. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов: учеб. пособие / Л.Г. Петрова, Г.Ю. Тимофеева, П.Е. Демин, А.В. Косачев. М.: МАДИ, 2016. С. 52–53.
11. Мишкин С.И., Клименко О.Н., Гуняева А.Г. Материалы для молниезащиты авиационной техники // *Труды ВИАМ*. 2023. № 7 (125). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92.
12. Кравченко Д.В., Козлов И.А., Никифоров А.А., Толмачев Я.В. Влияние способов подготовки поверхности алюминиевого сплава 1163-AT на адгезию гальванических покрытий // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-74-88.
13. Старцев В.О., Нечаев А.А. Влияние натуральных и ускоренных климатических испытаний на прочность наномодифицированного углепластика // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 28.08.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.
14. Абрамова М.Г. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов при испытаниях на станциях континентального и морского типа // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 3 (60). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-57-65.
15. Козлова А.А., Кузнецова В.А., Козлов И.А., Наприенко С.А., Силаева А.А. Влияние длительных нагревов на свойства защитных покрытий для алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80.

References

1. 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.
2. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
3. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Kablov E.N., Startsev O.V. The basic and applied research in the field of corrosion and ageing of materials in natural environments (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 4 (37), pp. 38–52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
5. Kablov E.N. Innovative development is the most important priority of the state. *Metally Evrazii*, 2010, no. 2, pp. 6–11.
6. Kablov E.N. What will the future be made of? New generation materials, technologies for their creation and processing - the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
7. Sadkov V.V., Mirkin I.I. Ensuring corrosion resistance of aluminum structures in TU aircraft. *Tsvetnye metally*, 2006, no. 11, pp. 73–76.
8. Feigenbaum Yu.M., Dubinsky S.V. The influence of accidental operational damage on the strength and service life of aircraft structures. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2013, no. 187, pp. 83–91.
9. Agarwala V.S. Aircraft corrosion and aging: problems and controls. *Proceedings of 15th ICC*. Granada, 2002, pp. 3–12.
10. *Fundamentals of electrochemical corrosion of metals and alloys*: textbook. allowance. Moscow: MADI, 2016, pp. 52–53.
11. Mishkin S.I., Klimenko O.N., Gunyaeva A.G. Materials for the lightnings protection of aviation engineering. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 01, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-84-92.
12. Kravchenko D.V., Kozlov I.A., Nikiforov A.A., Tolmachev Y.V. The influence of 1163-AT aluminium alloy surface preparation on the adhesion of electroplated coatings. *Trudy VIAM*, 2022, no. 6 (112), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 29, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-74-88.
13. Startsev V.O., Nechaev A.A. The influence of natural and accelerated weathering on the nanomodified CFRP'S strength. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: August 28, 2023) DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-134-151.
14. Abramova M.G. Full-scale accelerated tests of aluminum alloys at continental and marine type stations. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 3 (60), pp. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-57-65.
15. Kozlova A.A., Kuznetsova V.A., Kozlov I.A., Naprienko S.A., Silaeva A.A. The effect of prolonged heating on the properties of protective coatings for aluminum alloy system Al–Si–Mg. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80.

Информация об авторах

Фомина Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Заварзин Семен Витальевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Демин Семен Анатольевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Marina A. Fomina, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Semyon V. Zavarzin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Semyon A. Demin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 15.09.2023.
 The article was submitted 13.09.2023; approved and accepted for publication after reviewing 15.09.2023.