

Научная статья

УДК 667.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-81-95

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОСТАВА ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАПОЛНЕНИЯ СЕРНОКИСЛОТНОГО АНОДНО-ОКСИДНОГО ПОКРЫТИЯ И СПОСОБЫ ЕГО АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

К.Е. Захаров¹, М.А. Фомина¹, А.И. Вдовин¹, Е.С. Чумакова¹

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

Аннотация. Наиболее известным способом защиты от коррозии алюминия и его сплавов является сернокислотное анодное оксидирование. Оксидированная поверхность обладает высокими адгезионными свойствами и существенной способностью к сопротивлению агрессивным внешним факторам. Однако покрытие требует дополнительной обработки, называемой наполнением и заключающейся в выдержке в горячих растворах. Приводятся исследования, направленные на разработку состава и нового способа наполнения анодно-оксидного покрытия, оценивается возможность применения данного состава в качестве ингибитора коррозии.

Ключевые слова: анодно-оксидные покрытия, наполнение, защита от коррозии, ингибиторы коррозии

Для цитирования: Захаров К.Е., Фомина М.А., Вдовин А.И., Чумакова Е.С. Оценка эффективности состава для низкотемпературного наполнения сернокислотного анодно-оксидного покрытия и способы его альтернативного применения // Труды ВИАМ. 2025. № 4 (146). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-81-95.

Scientific article

EFFICIENCY EVALUATION OF THE COMPOSITION FOR LOW-TEMPERATURE FILLING OF SULFURIC ACID ANODIC-OXIDE COATING AND METHODS OF ITS ALTERNATIVE APPLICATION

K.E. Zakharov¹, M.A. Fomina¹, A.I. Vdovin¹, E.S. Chumakova¹

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 most known method of protection against corrosion of aluminum and its alloys is sulfuric acid anodic oxidation. The oxidized surface has a significant ability to resist aggressive external factors, high adhesion properties. However, the coating requires an additional treatment consisting of soaking in hot solutions, called filling. The article presents the results of research aimed at the development of the composition and a new method of filling anodic-oxide coating, the possibility of using this composition as a corrosion inhibitor is evaluated.

Keywords: anodic-oxide coatings, filling, corrosion protection, corrosion inhibitors

For citation: Zakharov K.E., Fomina M.A., Vdovin A.I., Chumakova E.S. Efficiency evaluation of the composition for low-temperature filling of sulfuric acid anodic-oxide coating and methods of its alternative application. *Trudy VIAM*, 2025, no. 4 (146), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-4-81-95.

Введение

К изделиям авиакосмической отрасли предъявляются повышенные требования при использовании коррозионностойких материалов. Изделия авиационной техники должны обладать высокими прочностными характеристиками при эксплуатации в различных условиях, а также сохранять высокий ресурс эксплуатации [1–3].

Алюминий относится к группе активных металлов, его стандартный равновесный потенциал составляет $-1,67$ В. В обычных условиях алюминий может взаимодействовать с кислотами, щелочами, воздушной и водной средами. В воздушной среде алюминий имеет свойство окисляться – на его поверхности образуется тонкая оксидная пленка, которая препятствует активации коррозионных процессов, стойка в нейтральных и слабокислых растворах, однако по причине малой толщины не обеспечивает должной антикоррозионной защиты и функциональных свойств.

Наиболее известным способом защиты алюминия и его сплавов является анодное оксидирование [4–6]. Процесс протекает в стационарных ваннах при полном погружении деталей. Оксидированная поверхность обладает существенной способностью к сопротивлению агрессивным внешним факторам, а также хорошими адгезионными свойствами; может приобретать такие ценные свойства, как твердость, электроизоляционная способность и износостойкость.

Покрытие состоит из двух слоев: тонкого ($0,2-0,3$ нм) беспористого барьерного слоя и пористого основного слоя ($6-14$ мкм). Вследствие пористости покрытие само по себе не обладает удовлетворительной защитной способностью и требует дополнительной обработки, называемой наполнением (уплотнением) и заключающейся в выдержке в горячих растворах. Наполнение осуществляют либо в горячих растворах хроматов (что является наиболее эффективной защитой), либо в горячей дистиллированной/деминерализованной воде – данный метод дает худший эффект, однако широко применяется на тех предприятиях, где остро стоят проблемы охраны природы.

Состав марки ВИС-А [7] разработан в качестве альтернативы стандартному хроматному наполнению – сравнительные испытания в камере солевого тумана (КСТ) показали высокую защитную способность такого способа обработки серноокислотного покрытия. Причем защитная способность покрытия, наполненного при температурах $90-95$ °С, находится на уровне покрытия, наполненного при температурах $38-42$ °С, т. е. почти в 2 раза ниже. В данной статье отражены результаты, касающиеся решения производственных вопросов при применении разработанного состава в заводских условиях – определение истощаемости ванны наполнения с увеличением количества обрабатываемых деталей, разработка методик контроля содержания компонентов ванны, экологические аспекты.

Кроме того, в данной работе исследована возможность применения состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии типовых металлических материалов – неанодированного алюминия, конструкционных сталей и меди. Результаты исследований в дальнейшем могут найти применение не только в авиационной, но и в строительной отрасли.

Материалы и методы

Для исследований использовали плоские образцы размером $100 \times 50 \times (1,5 \div 2)$ мм из типовых алюминиевых сплавов различных систем легирования (1163-Т, В95-Т2, АК4-Т1, 1933-Т3, АМг2), а также из стали 30ХГСА и меди М1.

Оценку истощаемости раствора наполнения осуществляли по изменению внешнего вида методом капельной пробы в соответствии с ПИ 1.2.616–2022.

Оценку защитных свойств наполненного сернокислотного анодно-оксидного покрытия проводили ускоренным методом в КСТ по ГОСТ 9.301–86, ГОСТ 9.302–88, ГОСТ 9.905–82 и ГОСТ 9.308–85.

Возможность применения состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии для антикоррозионной защиты определяли по ГОСТ 9.502–82 и ГОСТ 9.514–99.

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

Результаты и обсуждение

Технологии формирования защитных покрытий на поверхности металлических материалов часто связаны с существенной экологической нагрузкой на окружающую среду и относительно высокой энергозатратностью. В частности, лучшим способом защиты от коррозии деталей из алюминиевых сплавов считается применение веществ, содержащих в составе соединения шестивалентного хрома, которые, в свою очередь, являются чрезвычайно опасными для человека и окружающей среды [8, 9].

Разработанный состав марки ВИС-А содержит в составе несколько ингибиторов коррозии в относительно малых концентрациях, однако возникающий при этом синергетический эффект позволяет использовать состав в качестве раствора для наполнения сернокислотных анодно-оксидных покрытий [10–15]. Покрытие, модифицированное данным способом, по своим защитным характеристикам не уступает наполненному по стандартной технологии покрытию. Проведенные ранее исследования защитной способности наполненных покрытий показали, что процесс возможно осуществлять при температурах 38–42 °С, что ниже стандартных температур более чем в 2 раза. Таким образом, применение данного способа наполнения анодно-оксидных покрытий на производствах (особенно с учетом объема гальванических ванн, используемых в процессе) может быть успешно внедрено. Еще одним важным фактором, влияющим на эффективность применения того или иного гальванического процесса, на практике является способность с помощью раствора или электролита формировать качественное покрытие при увеличении пропущенной через ванну суммарной площади металла, т. е. истощаемость раствора. Кроме того, большое внимание уделяется корректировке раствора, его регенерации и утилизации.

Для выполнения указанной задачи образцы с сернокислотным анодно-оксидным покрытием последовательно обрабатывали (наполняли) в 1 л водного раствора состава марки ВИС-А (концентрация выбрана в соответствии с ТУ 1-595-7–1974 на состав и обусловлена результатами ранее выполненных работ) при температурах 38–42 °С в течение 20 мин.

Качество покрытия определяли с помощью трех стандартных показателей: по показателю капельной пробы, по изменению внешнего вида анодно-оксидного покрытия, а также по внешнему виду образцов из алюминиевых сплавов с анодно-оксидным покрытием после испытания в КСТ в течение не менее 720 ч. Оценку качества наполненного покрытия осуществляли для «нулевой» точки, а также с шагом достижения суммарной площади наполненного покрытия 5 дм² в 1 л.

Определение показателя капельной пробы осуществляли следующим образом – на образец наносили 5 капель контрольного раствора следующего состава: 25 мл соляной кислоты с плотностью 1,19 г/см³; 3 г двуххромовокислого калия; 75 мл дистиллированной воды. После нанесения следили за изменением цвета раствора с ярко-оранжевого до зеленого, что происходит вследствие растворения покрытия и восстановления шестивалентного хрома до трехвалентного.

Оценку изменения внешнего вида осуществляли визуально.

Сравнительные испытания в КСТ проводили при непрерывном распылении 5%-ного раствора NaCl, значение pH раствора составляло от 6,5 до 7,2 при температуре испытаний 35 °С в течение 720 ч. Во время испытаний осуществляли еженедельный контроль внешнего вида образцов для выявления момента образования первых очагов коррозии.

На рис. 1 и 2 приведены типичные фотографии образцов из сплава 1163-Т с анодно-оксидным покрытием, как наиболее показательные.

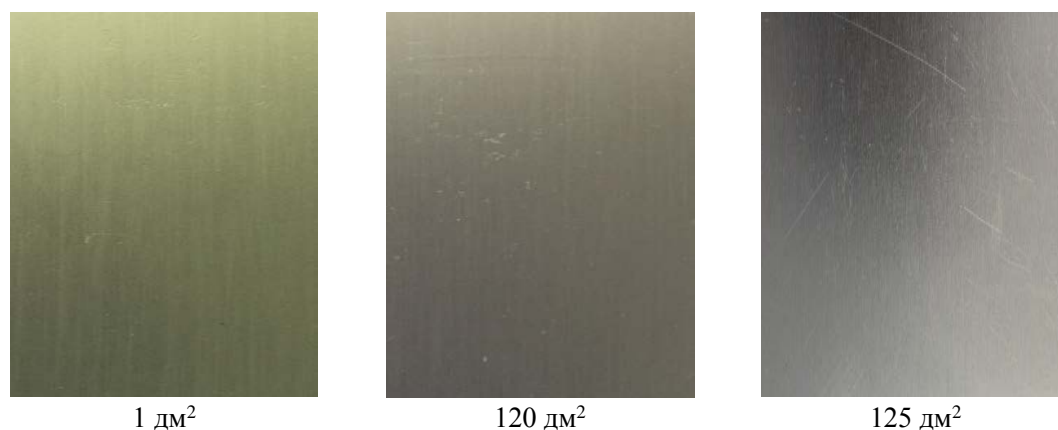


Рис. 1. Изменение цвета наполненного анодно-оксидного покрытия, полученного на сплаве 1163-Т, в зависимости от суммарной обработанной площади

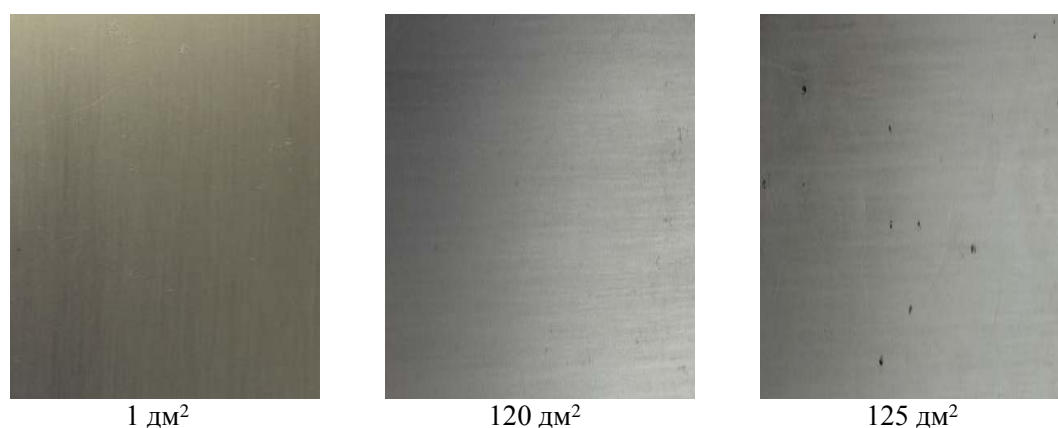


Рис. 2. Состояние поверхности после экспозиции в камере солевого тумана наполненного анодно-оксидного покрытия, полученного на сплаве 1163-Т, в зависимости от суммарной обработанной площади

Установлено, что время, требуемое для изменения цвета капли (капельная проба), для всех исследуемых сплавов уменьшается с увеличением суммарно обработанной площади покрытия (рис. 3). Аналогичная тенденция наблюдается и с изменением интенсивности цвета покрытия, однако данные изменения сами по себе не могут свидетельствовать о недостаточном качестве уплотненного покрытия. Четкая зависимость качества покрытия от общей обработанной площади поверхности наблюдается при оценке результатов испытаний в КСТ – на образцах из сплавов 1163-Т, В95-Т2, АК4-Т1, 1933-Т3 с покрытием, наполненным в растворе, в котором предварительно обработано >120 дм² поверхности (125 и 130 дм²), имеются существенные коррозионные поражения в виде массовых питтингов глубиной до 12 мкм (рис. 4 и 5). На

аналогичных образцах из сплава АМг2 коррозионные поражения отсутствуют – это объясняется более высокой коррозионной стойкостью сплава.

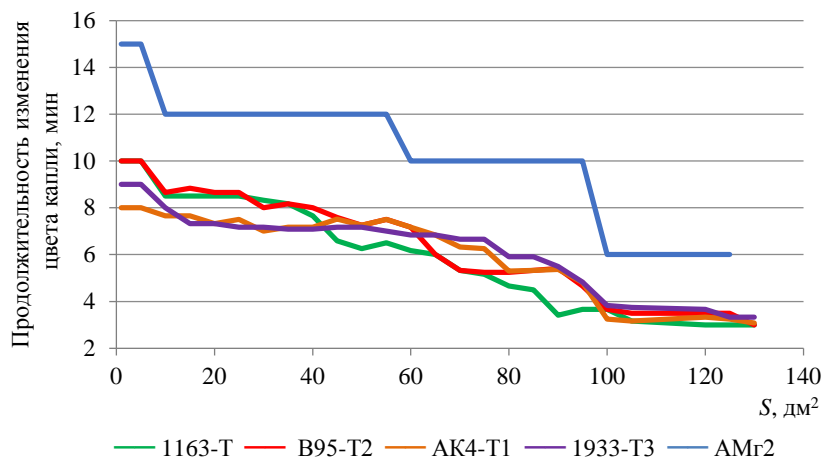


Рис. 3. Зависимости показателей каплевой пробы от суммарной площади S обработанной поверхности для алюминиевых сплавов различных систем легирования

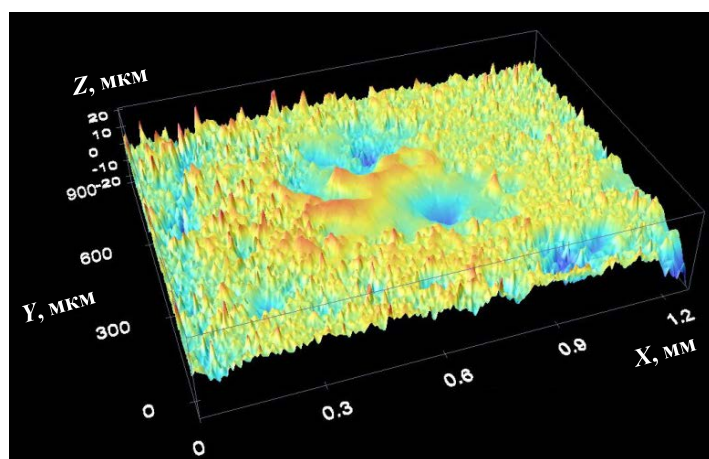


Рис. 4. 3D-изображение участка образца из сплава 1163-T с коррозионным поражением

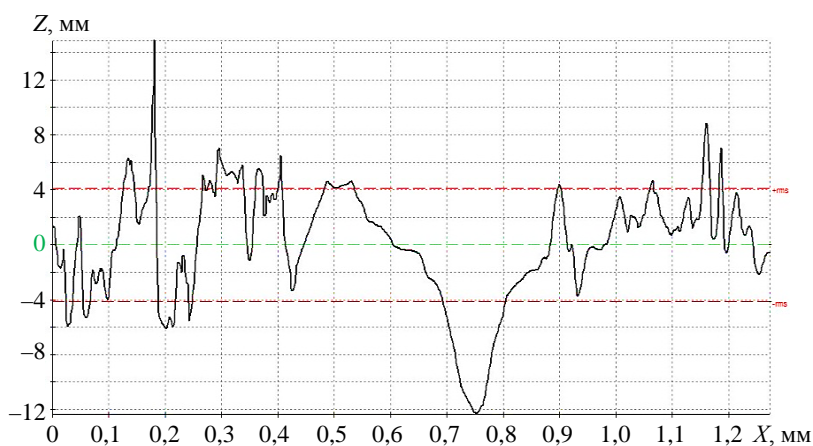


Рис. 5. Глубина коррозионных поражений, обнаруженных на образцах из сплава 1163-T

Исходя из полученных данных, определена допустимая суммарная площадь обработки поверхности деталей из алюминиевых сплавов, при которой анодно-оксидное покрытие удовлетворяет требованиям нормативной документации – в 1 л водного раствора состава марки ВИС-А возможно наполнение поверхности площадью 120 дм² с сернокислотным анодно-оксидным покрытием без потери его защитных свойств.

Затем исследован химический состав и проведен анализ ванны водного раствора состава марки ВИС-А с применением методов титриметрического и спектрофотометрического анализов, по результатам которых разработаны методики определения компонентов раствора и способов корректировки их концентраций. Результаты данных исследований положены в основу разработки технологии применения состава марки ВИС-А и внесены в производственную инструкцию ПИ 1.2.616–2022.

Для определения защитной способности состава марки ВИС-А как ингибитора коррозии проводили коррозионные испытания в статических условиях [16, 17], для чего выбраны две коррозионные среды: дистиллированная вода и водный раствор состава марки ВИС-А.

Выбор в качестве коррозионных сред дистиллированной воды и раствора ВИС-А в дистиллированной воде обусловлен необходимостью одновременно исследовать как агрессивность состава марки ВИС-А, так и его ингибирующую способность в рекомендованной концентрации по отношению к типовым металлическим материалам. Благодаря низкой агрессивности, в данных коррозионных средах процессы протекают с невысокой интенсивностью, что позволяет проследить этапы развития коррозии на образцах металлических материалов и ингибирующий эффект, достигаемый при применении ингибитора. Согласно ГОСТ 9.502–82 (п. 1.4.14), испытание нового ингибитора, коррозионная агрессивность которого не установлена, необходимо проводить в дистиллированной воде, не содержащей и содержащей ингибитор в рекомендованной концентрации. В дальнейшем на основании полученных данных при необходимости могут быть установлены области применения ингибитора (минерализация водных растворов), максимально соответствующие конкретным эксплуатационным средам того или иного металлического материала.

Испытания проводили в камере тепла, холода и влаги с поддержанием постоянной температуры 25 °С и влажности 85 % в специальных ячейках, обеспечивающих возможность проведения длительных испытаний без уменьшения объема жидкости. В каждую ячейку подвешивали один образец в вертикальном положении, что позволяло обеспечить изоляцию образцов друг от друга и от стенок ячейки, а также обеспечивало свободный контакт образца с коррозионной средой.

Продолжительность испытаний для образцов из меди и стали составила 10 сут, для образцов из алюминиевого сплава 90 сут. Промежуточные съемы для стали и меди осуществляли через 1, 3, 5, 7, 10 сут, для алюминиевого сплава – через 1, 7, 15, 30, 60, 90 сут при количестве образцов на точку 5 шт.

По полученным данным проведен расчет защитной способности ингибитора (Z), которую вычисляли по формуле

$$Z = \frac{\Delta P - \Delta P_1}{\Delta P} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где ΔP , ΔP_1 – коррозионные потери на образце в коррозионной среде без и с добавлением состава марки ВИС-А, г.

Данные по значениям защитной способности ингибитора представлены в графическом виде на рис. 6.

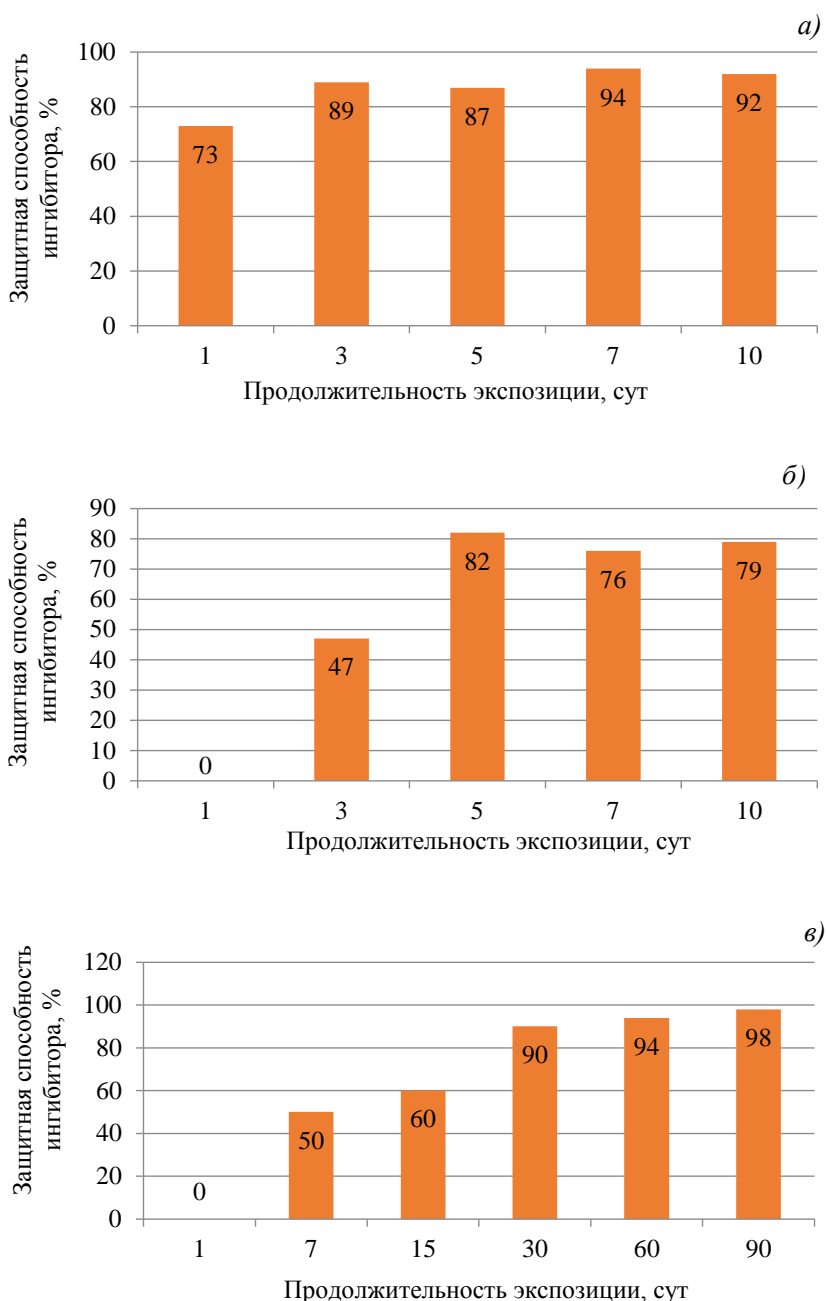


Рис. 6. Защитная способность ингибитора для образцов из стали 30ХГСА (а), меди М1 (б) и алюминиевого сплава 1163-Т (в)

Рассчитана сравнительная скорость коррозии металлических материалов в водной среде и водном растворе состава марки ВИС-А. Полученные данные также отражены на графиках, представленных на рис. 7.

Таким образом, скорость коррозии всех испытываемых металлических материалов в водной среде с ингибитором коррозии (составом марки ВИС-А) существенно меньше, чем скорость коррозии в водной среде без добавок. Так, скорость коррозии алюминиевого сплава 1163-Т в водном растворе с составом марки ВИС-А меньше в 50,4 раза по сравнению с показателями скорости коррозии в дистиллированной воде (экспозиция 90 сут); стали 30ХГСА – в 12,6 раза (экспозиция 10 сут); меди М1 – в 4,8 раза (экспозиция 10 сут).

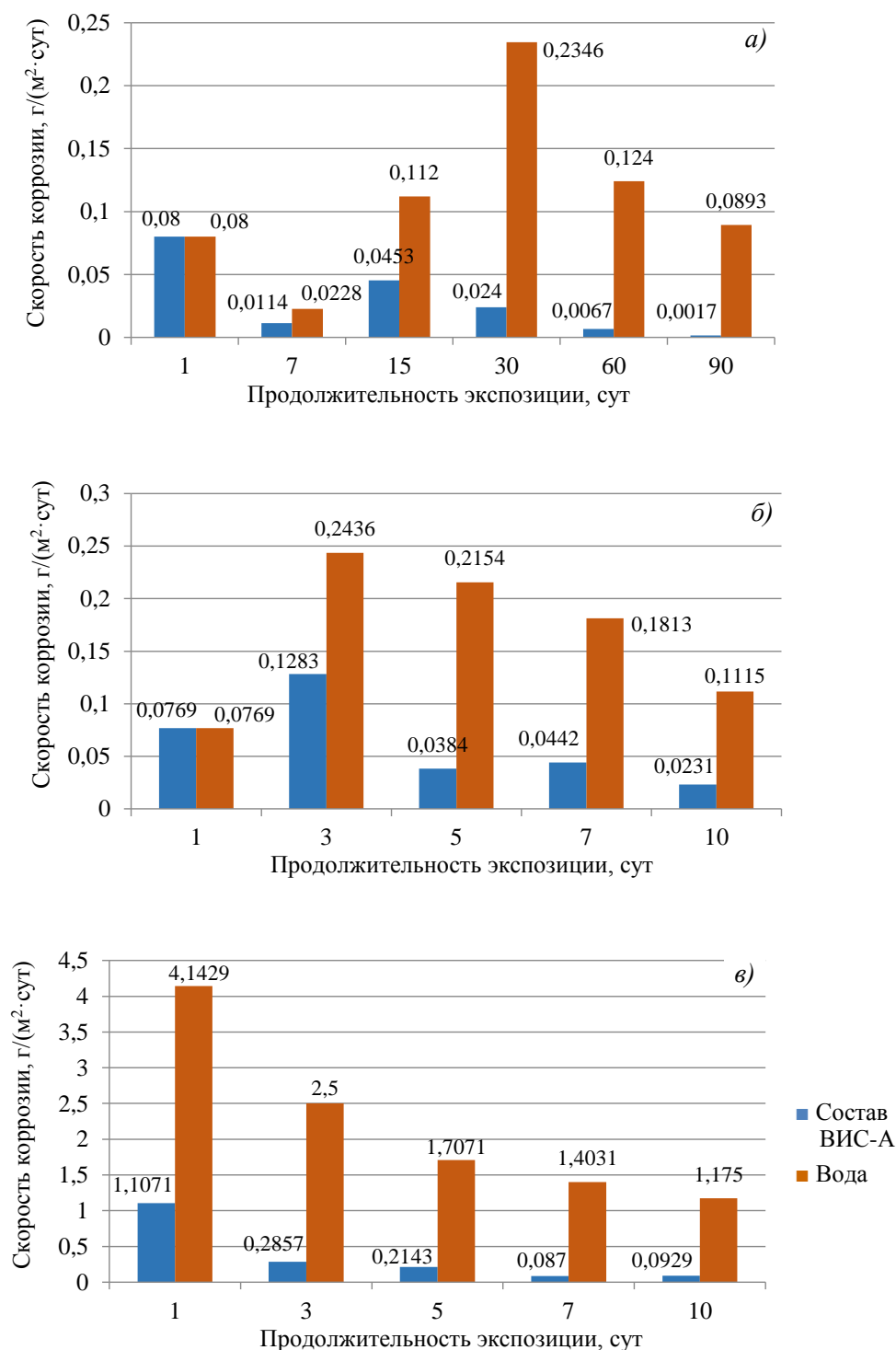


Рис. 7. Скорость коррозии для образцов из алюминиевого сплава 1163-Т (а), меди М1 (б) и стали 30ХГСА (в) в воде и в воде с составом марки ВИС-А

С учетом полученных данных можно сделать вывод о работоспособности состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии в водных средах для алюминиевых сплавов, сталей и меди. Данные свойства состава марки ВИС-А продемонстрированы также при визуальной оценке состояния поверхности металлических образцов (рис. 8–10).

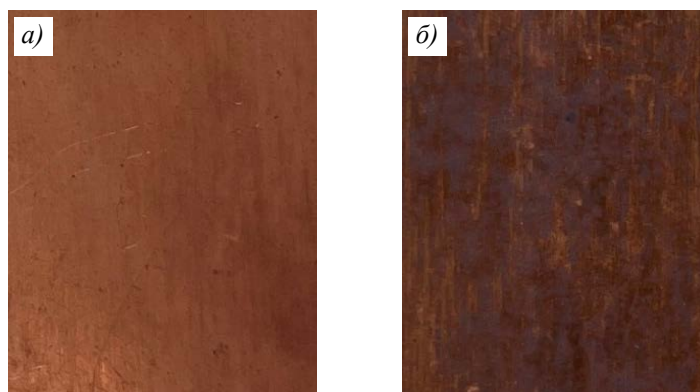


Рис. 8. Состояние поверхности образцов из меди М1 после экспозиции в камере тепла, холода и влаги (10 сут) в среде водного раствора состава ВИС-А (а) и дистиллированной воды (б)

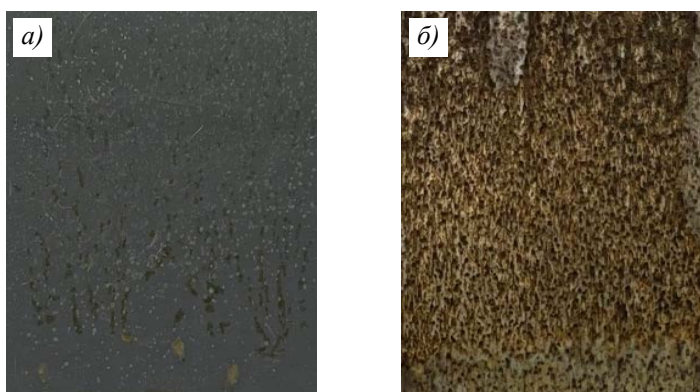


Рис. 9. Состояние поверхности образцов из стали 30ХГСА после экспозиции в камере тепла, холода и влаги (10 сут) в среде водного раствора состава ВИС-А (а) и дистиллированной воды (б)

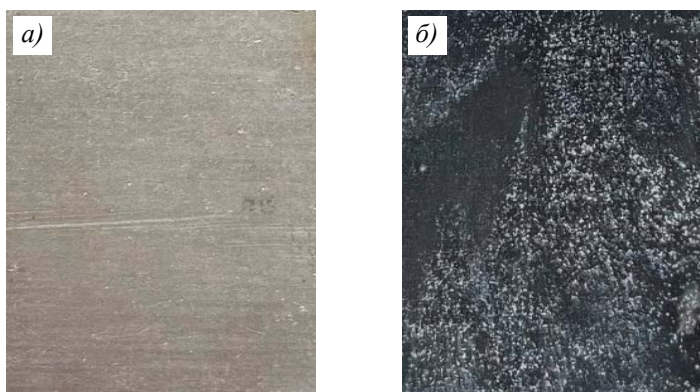


Рис. 10. Состояние поверхности образцов из алюминиевого сплава 1163-Т после экспозиции в камере тепла, холода и влаги (90 сут) в среде водного раствора состава ВИС-А (а) и дистиллированной воды (б)

Параллельно с вышеуказанными исследованиями осуществляли оценку защитной способности состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии с помощью электрохимических исследований [18–20].

Следует отметить, что данная методика рассчитана на исследование ингибиторов для металлических материалов, скорость коррозии которых зависит только от кинетики переноса заряда и не зависит от диффузии среды в приграничном слое. Поэтому исследовать алюминиевые сплавы по данной методике некорректно, а в качестве типовых металлических материалов выбрали сталь 30ХГСА и медь М1.

Для проведения электрохимического исследования использовали потенциостат и плоскую трехэлектродную ячейку, позволяющую задавать рабочую площадь образца 1 или 10 см². В качестве вспомогательного электрода применяли платиновую сетку, а электрода сравнения – хлорсеребряный электрод в насыщенном растворе KCl, потенциал которого в этой среде относительно нормального водородного электрода составляет +197 мВ.

Исследование электрохимического поведения металлических материалов проводили методом снятия анодной поляризационной кривой после 1 и 20 ч выдержки образцов в электролите. Поляризацию начинали с потенциала коррозии $E_{ст} = -100$ мВ со скоростью развертки 0,1 мВ/с и останавливали при достижении тока 10⁻² А/см² либо потенциала +500 мВ от потенциала коррозии.

Для проведения испытаний выбрали 3%-ный раствор NaCl для исследования состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии, в частности, при воздействии хлоридсодержащих сред. Концентрацию состава марки ВИС-А изменяли с 0,01 до 0,2 %. В целях исключения различия в концентрации готовили несколько партий раствора по 10 л, сделанных в разное время, и хранили в герметичных канистрах при комнатной температуре. Для приготовления растворов использовали деионизированную воду с электропроводностью ≤1 мкСм/см и реактивы ч.д.а. (чистые для анализа).

Определение защитной способности состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии проводили при сопоставлении скоростей коррозии ($V_{кор}$) металлических материалов в исследуемых растворах, которые рассчитывали по формуле

$$V_{кор} = \frac{I_{кор} \cdot M_{эв} \cdot K}{\rho \cdot S}, \quad (2)$$

где $I_{кор}$ – ток коррозии, А; $M_{эв}$ – молярная масса эквивалента, г/эв ($Fe \rightarrow Fe^{2+}$: $M_{эв} = 27,925$ г/эв; $Cu \rightarrow Cu^{2+}$: $M_{эв} = 31,773$ г/эв); K – константа, определяющая единицы измерения скорости коррозии – для мм/год: $K = 3272$ мм/(А·см·год); ρ – плотность испытываемого металлического материала, г/см³; S – площадь контакта образца со средой, см².

Плотность тока коррозии ($I_{кор}$) определяли экспериментально, анализируя потенциодинамические кривые металлических материалов в исследуемых растворах. Пример зависимости $E = f(\lg I/S)$ для стали 30ХГСА и меди М1 в 3%-ном растворе NaCl представлен на рис. 11.

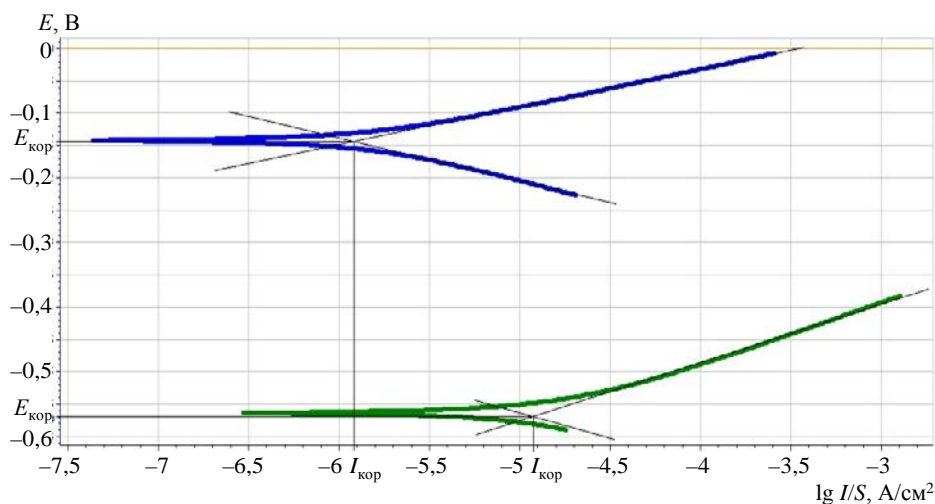


Рис. 11. Потенциодинамические кривые стали 30ХГСА (—) и меди М1 (—) в 3%-ном растворе NaCl

На полученной потенциодинамической кривой построены зависимости скорости анодного и катодного процессов от потенциала согласно зависимости Тафеля. Точка пересечения зависимостей характеризует потенциал $E_{кор}$ и плотность тока коррозии $I_{кор}$, значения которых представлены в табл. 1, даны также рассчитанные по формуле (2) скорости коррозии $V_{кор}$ для стали 30ХГСА и меди М1.

Таблица 1

Экспериментальные значения потенциала $E_{кор}$ и плотности тока $I_{кор}$, а также рассчитанные скорости коррозии $V_{кор}$ (средние значения трех измерений) для стали 30ХГСА и меди М1

Материал	Концентрация состава ВИС-А, %, в 3%-ном растворе NaCl	Время выдержки в растворе до испытаний, ч					
		1			20		
		$E_{кор}$, В	$I_{кор}$, мкА/см ²	$V_{кор}$, мм/год	$E_{кор}$, В	$I_{кор}$, мкА/см ²	$V_{кор}$, мм/год
Сталь 30ХГСА	0	-0,593	27,339	318,157	-0,703	6,082	70,779
	0,01	-0,561	20,847	242,608	-0,655	3,208	37,333
	0,05	-0,552	6,426	74,783	-0,557	0,427	4,969
	0,2	-0,477	5,534	64,402	-0,523	0,347	4,045
Медь М1	0	-0,142	1,392	16,185	-0,068	0,247	2,872
	0,01	-0,085	0,520	6,046	-0,052	0,037	0,430
	0,05	-0,135	0,147	1,709	0,008	0,001	0,012
	0,2	-0,055	0,014	0,163	0,010	0,0004	0,005

Видно, что наличие состава марки ВИС-А в электролите оказывает влияние на скорость коррозии меди М1 и стали 30ХГСА, в значительной степени уменьшая их. Так, скорость коррозии стали 30ХГСА в водном 3%-ном растворе NaCl в 1,3–4,9 раза больше, чем в водном 3%-ном растворе NaCl с добавлением состава марки ВИС-А в зависимости от концентрации (при условии выдержки в растворе до испытаний в течение 1 ч) и в 1,9–17,5 раза больше, чем в водном 3%-ном растворе NaCl с добавлением состава марки ВИС-А в зависимости от концентрации (при условии выдержки в растворе до испытаний в течение 20 ч); скорость коррозии меди М1 в водном 3%-ном растворе NaCl в 2,7–99 раз больше, чем в водном 3%-ном растворе NaCl с добавлением состава марки ВИС-А в зависимости от концентрации (при условии выдержки в растворе до испытаний в течение 1 ч); в 6,7–574 раза больше в зависимости от концентрации, чем в водном 3%-ном растворе NaCl с добавлением состава марки ВИС-А в зависимости от концентрации (при условии выдержки в растворе до испытаний в течение 20 ч).

Для оценки защитной способности состава марки ВИС-А в качестве ингибитора рассчитан коэффициент торможения коррозии (γ) и степень защиты ингибитора (ζ) по следующим формулам:

$$\gamma = \frac{V_0}{V};$$

$$\zeta = \frac{V_0 - V}{V_0} \cdot 100 \%,$$

где V_0 , V – соответственно скорость коррозии серии образцов в электролите без и с ингибитором, мм/год.

Если параметр $\zeta = 100 \%$ – коррозия отсутствует ($V = 0$); при $\zeta = 0 \%$ – защита отсутствует ($V_0 = V$); при $\zeta < 0 \%$ – стимулирование коррозии ($V_0 < V$); при $\zeta > 0 \%$ –

замедление коррозии ($V_0 > V$). Коэффициенты торможения коррозии и степень защиты состава марки ВИС-А, рассчитанные по данным скорости коррозии, указанных в табл. 1, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов торможения и степени защиты ингибитора

Материал	Концентрация состава ВИС-А, %, в 3%-ном растворе NaCl	Время выдержки в растворе до испытаний, ч			
		1		20	
		Коэффициент торможения коррозии	Степень защиты ингибитора, %	Коэффициент торможения коррозии	Степень защиты ингибитора, %
Сталь 30ХГСА	0,01	1,3	23,7	1,9	47,2
	0,05	4,2	76,5	14,2	92,9
	0,2	4,9	79,8	17,5	94,3
Медь М1	0,01	2,7	62,6	6,7	85,0
	0,05	9,5	89,4	239,3	99,5
	0,2	99,4	98,9	574,4	99,8

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии эффективно влияет на защиту выбранных металлических материалов в водном 3%-ном растворе NaCl. Степень защиты состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии при выдержке в растворе 1 и 20 ч соответственно достигает по отношению к стали 30ХГСА значений: 79,8 и 94,3 %, к меди М1 – до 98,9 и 99,8 %.

Полученные данные подтверждают способность состава марки ВИС-А существенно тормозить протекание коррозионного разрушения медных сплавов и сталей, что позволяет положительно оценить возможность применения состава марки ВИС-А в качестве ингибитора коррозии.

Заключения

Разработана технология применения водного раствора состава марки ВИС-А для наполнения сернокислотных анодно-оксидных покрытий для алюминиевых сплавов, позволяющая осуществлять обработку при пониженных температурах, а также обеспечивающая защитные свойства покрытия на уровне стандартно применяемой технологии.

Состав марки ВИС-А показал хорошие результаты при защите от коррозии таких типовых металлических материалов, как алюминий, конструкционная сталь и медь, что подтверждается не только гравиметрическими, но и электрохимическими испытаниями.

Состав марки ВИС-А потенциально может успешно применяться не только при формировании анодно-оксидных покрытий, но и в строительной и смежных отраслях в качестве ингибитора коррозии.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
2. Каблов Е.Н., Петрова А.П., Нарский А.Р. Алексей Тихонович Туманов – основатель новых научных направлений в материаловедении // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 1. С. 2–5.
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. № 1. С. 3–4.
4. Дуонова В.А., Леонов А.А., Молодцов С.В. Вклад ВИАМ в разработку легких сплавов и борьбу с коррозией изделий ракетно-космической техники // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.

5. Дуюнова В.А., Козлов И.А., Оглодков М.С., Козлова А.А. Современные тенденции анодного оксидирования алюминий-литиевых и алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
6. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. № 1. С. 3–8.
7. Фомина М.А., Волков И.А., Вдовин А.И., Ямщиков Е.И. Исследование защитной способности анодно-оксидного покрытия с экологически улучшенной технологией наполнения // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
8. 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.
9. Полякова М.А., Мустафина В.Г. Теория коррозии и методы защиты от коррозии: учеб. пособие. Магнитогорск, 2008. 139 с.
10. Агафонкина М.О., Андреева Н.П., Кузнецов Ю.И., Тимашев С.Ф. Замещенные бензотриазолы – ингибиторы коррозии меди в буферном боратном растворе коррозии // Журнал физической химии. 2017. Т. 91. № 8. С. 1294–1301.
11. Солоп Г.Р. Разработка и применение ингибиторов коррозии на основе продуктов нефтехимии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2016. 24 с.
12. Газизова Э.И., Бондарь М.А. Эффективность органических соединений в качестве ингибиторов коррозии // Актуальные проблемы защиты от коррозии нефтегазового оборудования и трубопроводов (Коррозия-2023): сб. материалов I Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 75-летию ФГБОУ ВО «УГНТУ». Уфа, 2023. С. 25–26.
13. Посунько И.А. Технология создания ингибиторов атмосферной коррозии // Научные исследования: теория, методика и практика: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. Чебоксары, 2017. С. 149–156.
14. Кадникова О.Ю., Торетаев М.О., Акмалова О.А., Нурмухамбетова Б.Т., Кожабергенова К.Д. Разработка экологически безопасных ингибиторов коррозии для защиты текстильного оборудования // Вестник Алматинского технологического университета. 2020. № 4. С. 38–46.
15. Мухаметзянов М.И., Шакирова А.И. Исследование коррозии алюминиевых сплавов и возможные методы их защиты // Современные технологии в нефтегазовом деле – 2016: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию филиала. Уфа, 2016. С. 475–482.
16. 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.
17. Ветрова Е.Ю., Щекин В.К., Курс М.Г. Сравнительная оценка методов определения коррозионной агрессивности атмосферы // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
18. 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.
19. Антипов В.В., Медведев И.М., Кутырев А.Е., Волков И.А. Разработка экспресс-метода оценки защитных свойств анодно-оксидных покрытий, наполненных горячей водой, при испытаниях в растворе NaCl // Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-67-78.
20. Дуюнова В.А., Кутырев А.Е., Серебренникова Н.Ю., Вдовин А.И., Сомов А.В. Исследование воздействия агрессивных факторов внешней среды на развитие коррозионных поражений на образцах слоистого металлогластикопластика класса СИАЛ // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.01.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.

References

1. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace engineering of the XXI century. *Perspektivnye materialy*, 2000, no. 3, pp. 27–36.
2. Kablov E.N., Petrova A.P., Narsky A.R. Alexey Tikhonovich Tumanov – the founder of new scientific directions in materials science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 1, pp. 2–5.
3. Kablov E.N. Chemistry in aviation materials science. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. LIV, no. 1, pp. 3–4.
4. Duyunova V.A., Leonov A.A., Molodtsov S.V. VIAM's contribution to the development of light alloys and the corrosion control of rocket and space technology products. *Trudy VIAM*, 2020, no. 2 (86), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30.
5. Duyunova V.A., Kozlov I.A., Oglodkov M.S., Kozlova A.A. Modern trends in the anodic oxidation of aluminum-lithium and aluminum alloys (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
6. Kablov E.N. Quality control of materials – a guarantee of safety of operation of aviation equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 3–8.
7. Fomina M.A., Volkov I.A., Vdovin A.I., Yamshchikov E.I. Study of protective capacity anodic oxide coating with environmental friendly improved filling technology. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
8. 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.
9. Polyakova M.A., Mustafina V.G. *Theory of corrosion and methods of corrosion protection: textbook*. Magnitogorsk, 2008, 139 p.
10. Agafonkina M.O., Andreeva N.P., Kuznetsov Yu.I., Timashev S.F. Substituted benzotriazoles – copper corrosion inhibitors in a buffered borate corrosion solution. *Zhurnal fizicheskoy khimii*, 2017, vol. 91, no. 8, pp. 1294–1301.
11. Solop G.R. *Development and application of corrosion inhibitors based on petrochemical products: thesis abstract*, Cand. Sc. (Tech.). Ufa, 2016, 24 p.
12. Gazizova E.I., Bondar M.A. Efficiency of organic compounds as corrosion inhibitors. *Actual problems of corrosion protection of oil and gas equipment and pipelines (Corrosion–2023): collection of materials of the I Int. scientific and technical. conf., dedicated to the 75th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «USPTU»*. Ufa, 2023, pp. 25–26.
13. Posunko I.A. Technology of creating atmospheric corrosion inhibitors. *Scientific research: theory, methodology and practice: collection of materials of the II Int. scientific and practical. conf.* Cheboksary, 2017, pp. 149–156.
14. Kadnikova O.Yu., Toretaev M.O., Akmalova O.A., Nurmukhambetova B.T., Kozhabergenova K.D. Development of environmentally friendly corrosion inhibitors for the protection of textile equipment. *Vestnik Almatinskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2020, no. 4, pp. 38–46.
15. Mukhametzyanov M.I., Shakirova A.I. Study of corrosion of aluminum alloys and possible methods of their protection. *Modern technologies in the oil and gas industry – 2016: collection of works. International scientific and technical conf., dedicated to the 60th anniversary of the branch*. Ufa, 2016, pp. 475–482.
16. 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.
17. Vetrova E.Yu., Shchekin V.K., Kurs M.G. Comparative evaluation of methods for the determination of corrosion aggressivity of the atmosphere. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.

18. 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.
19. Antipov V.V., Medvedev I.M., Kuttyrev A.E., Volkov I.A. Rapid assessment of hot water sealed anodic oxide coatings protective properties during NaCl immersion testing. *Trudy VIAM*, 2019, no. 8 (80), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 15, 2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-71-82.
20. Duyunova V.A., Kuttyrev A.E., Serebrennikova N.Yu., Vdovin A.I., Somov A.V. Examination of the impact of aggressive environmental factors on the development of corrosion damage on samples of laminated glass-reinforced plastic of SIAL class. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-81-90.

Информация об авторах

Захаров Кирилл Евгеньевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Фомина Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вдовин Александр Ильич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Чумакова Екатерина Сергеевна, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Kirill E. Zakharov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

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

Ekaterina S. Chumakova, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.11.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 28.11.2024.
The article was submitted 28.11.2024; approved and accepted for publication after reviewing 28.11.2024.