

Научная статья

УДК 620.193

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ, ПРИМЕНЯЕМОЙ В ИЗДЕЛИЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

А.Е. Кутырев¹, А.И. Вдовин¹, В.В. Антипов¹, В.А. Дуюнова¹

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

Аннотация. Рассмотрен вопрос разработки методики проведения испытаний, позволяющей выбрать наиболее высокоэффективную комплексную систему противокоррозионной защиты. Отмечены принципы испытаний систем противокоррозионной защиты. Изготовлены конструктивно-подобные образцы, представляющие собой соединение алюминиевого сплава 1163-АТ и углепластика марки ВКУ-25 с помощью крепежа из титанового сплава ВТ6 с применением и без защитных покрытий на основе грунтовок, эмалей, лаков, герметиков и паст. Проведены натурные испытания конструктивно-подобных образцов. Предложен алгоритм оценки коррозионных поражений на конструктивно-подобных образцах для выбора комплексной системы защиты.

Ключевые слова: коррозия, испытания противокоррозионной защиты, контактная коррозия алюминиевых сплавов, анализ коррозионного состояния, натурные испытания, конструктивно-подобные образцы

Для цитирования: Кутырев А.Е., Вдовин А.И., Антипов В.В., Дуюнова В.А. Методические вопросы исследования эффективности противокоррозионной защиты, применяемой в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2024. № 1 (131). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91.

Scientific article

METHODOLOGICAL ISSUES OF STUDYING THE EFFECTIVENESS OF ANTICORROSION PROTECTION USED IN AVIATION EQUIPMENT PRODUCTS

A.E. Kutyrev¹, A.I. Vdovin¹, V.V. Antipov¹, V.A. Duyunova¹

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

Abstract. The question of development of methodology for testing, allowing to choose the most highly effective complex system of anticorrosion protection, is considered. The principles of testing of corrosion protection systems are noted/ Structurally similar specimens representing the connection of aluminum alloy 1163-AT and carbon plastic of mark VKU-25 with the help of fasteners from titanium alloy VT6 as with application of protective coatings on the basis of primers, enamels, varnishes, sealants and pastes, and without their application are made. The algorithm of evaluation of corrosion lesions on structural-like samples for selection of complex protection system is proposed.

Keywords: corrosion, corrosion protection tests, contact corrosion of aluminum alloys, corrosion state analysis, full-scale tests, design-like specimens

For citation: Kutylev A.E., Vdovin A.I., Antipov V.V., Duyunova V.A. Methodological issues of studying the effectiveness of anticorrosion protection used in aviation equipment products. *Trudy VIAM*, 2024, no. 1 (131), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91.

Введение

Алюминиевые сплавы являются основным материалом для изготовления изделий авиационной техники. Однако в последнее время наблюдается тенденция к увеличению доли полимерных композиционных материалов в авиастроении. Более широкое применение углепластиков в конструкции изделий авиационной техники позволит увеличить весовую эффективность и, как следствие, экономическую эффективность их эксплуатации. Так, в конструкции лайнеров А320, А340 и В777 доля композиционных материалов составляет 10–15 % от массы самолетов, лайнеров А350 и Boeing 787 Dreamliner: 52 и 50 % соответственно. В конструкции планера отечественного изделия МС-21 планируется применять уже 35 % углепластиков от доли всех материалов [1].

Однако использование углепластиков в авиастроении ограничено их способностью вызывать контактную коррозию алюминиевых сплавов [2], которая в авиации считается одним из самых опасных видов коррозии, поскольку протекает с высокой скоростью [3]. Кроме того, необходимо учитывать и особенность развития коррозии на алюминиевых сплавах – наличие питтинговой, межкристаллитной и расслаивающей коррозий [4]. Появление расслаивающей коррозии зачастую начинается с питтинговой коррозии [5]. Так, в работе [6] показано, что контакт алюминиевого сплава с нержавеющей сталью привел к ускоренному росту питтингов, в результате чего вызвал появление расслаивающей коррозии.

Возможность появления коррозионных поражений существенно увеличивает стоимость обслуживания воздушных судов и напрямую связана с безопасностью их эксплуатации [7, 8]. Стоимость обслуживания «стареющих» воздушных судов повышается не только в результате роста вероятности коррозионных поражений при увеличении срока их эксплуатации. До сих пор не решен ряд вопросов, связанных с коррозией алюминиевых сплавов, в частности прогнозирование развития коррозионных поражений и изучение их влияния на прочностные свойства [9, 10]. На практике деталь из алюминиевых сплавов заменяют при глубине коррозии более 10 % от толщины детали [11].

Предотвращение появления коррозионных поражений, особенно в местах контакта алюминиевых сплавов с материалами, вызывающими контактную коррозию, является одной из наиболее важных задач при проектировании воздушных судов. Это обеспечивается применением высокоэффективной системы противокоррозионной защиты (ПКЗ), правильность выбора которой должна подтверждаться результатами коррозионных испытаний.

Обычно разработчики средств и технологий защиты оценивают защитную способность отдельных элементов системы ПКЗ [12–14]. Работы, посвященные исследованию комплексных систем защиты, практически отсутствуют. Кроме того, несмотря на наличие большого количества методик испытаний для оценки свойств средств и технологий защиты, до сих пор не существует однозначно принятой методики, позволяющей выбрать наиболее оптимальную и высокоэффективную систему ПКЗ. Данная работа посвящена этому вопросу.

Материалы и методы

Для электрохимических измерений использовали следующие материалы: алюминиевый сплав 1163-АТ, титановый сплав ВТ6, нержавеющую сталь 12Х18Н10Т и углепластик ВКУ-25. Поверхность алюминиевого сплава подготавливали согласно

ГОСТ 9.913–90 (время травления увеличивали для полного удаления лакировочного слоя), поверхность нержавеющей стали – согласно ГОСТ 9.308–85. Подготовку поверхности листов титанового сплава ВТ6 осуществляли травлением в растворе азотной и плавиковой кислот. Образцы из углепластика ВКУ-25 обрабатывали сухим корундом белым марки 25А (ГОСТ 28818–90) зернистостью F70 или F20 (ГОСТ Р 52381–2005) до полного устранения глянца.

Для определения скорости контактной коррозии (плотности тока контактной пары) анодные (АПК) и катодные поляризационные кривые (КПК) анализировали графическим методом. Поляризационные кривые получали с помощью потенциостата. Применяли трехэлектродную ячейку, позволяющую задавать рабочую площадь образца 1 см^2 . Вспомогательным электродом служила платиновая сетка, электродом сравнения – каломельный электрод (к.э.) в насыщенном растворе КСl.

Измерения проводили в наиболее распространенном растворе для проведения электрохимических исследований в нейтральных условиях – в 3%-ном водном растворе NaCl. Использовали бидистиллированную воду и реактив ч.д.а. Первоначально измеряли потенциал коррозии $E_{\text{ст}}$ образцов в течение 1 ч. Съемку АПК и КПК начинали со значений потенциала на 100 мВ положительнее и отрицательнее потенциала $E_{\text{ст}}$ соответственно. Скорость развертки потенциала составляла 0,16 мВ/с. Снятие АПК проводили до достижения плотности тока 10^{-2} А/см^2 либо потенциала +300 мВ, снятие КПК – до достижения плотности тока 10^{-2} А/см^2 либо потенциала –1200 мВ.

Для изготовления конструктивно-подобного образца (КПО) использовали пластины из алюминиевого сплава 1163-Т (с удаленной лакировкой), пластины из углепластика ВКУ-25, лакированного стеклопластиком, и болтовое соединение из титанового сплава ВТ6 (Ан.Окс.имп). Эскиз КПО представлен на рис. 1.

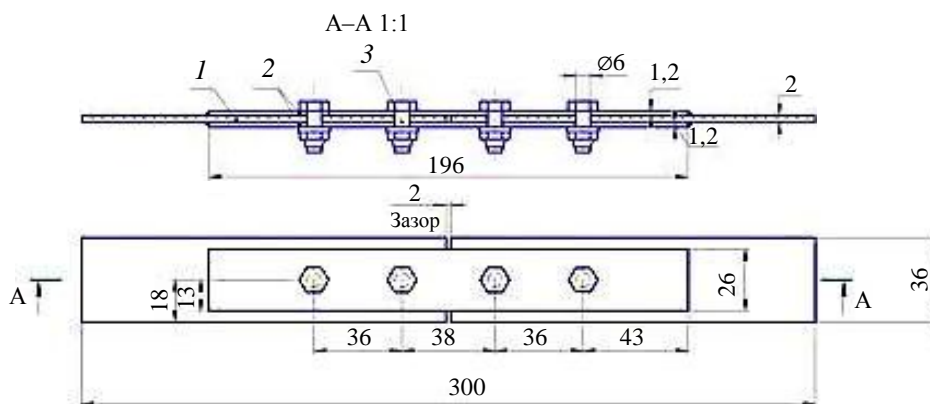


Рис. 1. Эскиз конструктивно-подобного образца с применением четырехболтового соединения для испытаний системы противокоррозионной защиты: 1 – алюминиевый сплав; 2 – углепластик; 3 – крепеж

Поверхность алюминиевого сплава подвергали стандартному серноокислому анодированию и последующему наполнению в растворе бихромата калия (Ан.Окс.нхр) согласно ГОСТ 9.305–84 и в экологически безопасном растворе ингибиторов (Ан.Окс.нэр) согласно работе [15]. После анодирования алюминиевые пластины окрашивали грунтовкой ЭП-0215М или PPG PR205, далее высверливали отверстия.

Пластины из углепластика окрашивали выравнивающей грунтовкой ЭП-0104 либо грунтовкой PPG PR205. Перед нанесением грунтовки поверхность деталей из углепластика тщательно зачищали шкуркой зернистостью ≤ 20 до полного удаления

глянца, а затем обезжиривали с помощью марлевых салфеток, смоченных растворителем нефрас-С2-80/120 с добавлением антистатической присадки АСП-3.

Крепеж устанавливали на пасту ВП-1, грунтовки ЭП-0215 и PPG PR205. Постановку крепежа на грунтовку проводили методом погружения. Антикоррозионную пасту ВП-1 на сопрягаемые поверхности крепежных деталей наносили колонковой кистью. Крепеж устанавливали с помощью динамометрического ключа с усилием 10 Н/м.

Кромки пластины алюминиевого сплава в составе КПО обрабатывали жгутовым герметиком У-30МЭС-5НТ марки «а», ВИТЭФ-1НТ или PR1782В2. Затем КПО окрашивали эмалями ВЭ-69 и СА-9008. Часть КПО изготавливали без применения средств защиты – использовали только анодированные алюминиевые сплавы, плакированный стеклопластик углепластик и оксидированный крепеж из титанового сплава ВТ6 (Ан.Окс.имп). Фотографии изготовленных КПО с применением и без системы ПКЗ представлены на рис. 2.

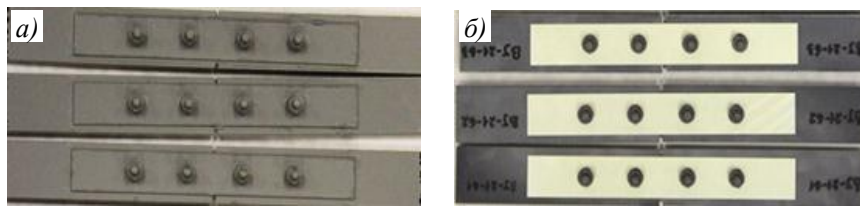


Рис. 2. Внешний вид конструктивно-подобных образцов с применением (а) и без полной системы противокоррозионной защиты (б)

Натурные испытания проводили согласно ГОСТ 9.906–83 на трех климатических площадках на территории РФ: г. Москва (умеренный климат промышленной атмосферы), г. Геленджик (умеренно теплый климат приморской атмосферы) и г. Якутск (очень холодный климат); а также на трех климатических площадках КНР: г. Лхаса (высокогорный климат с низкими температурами), г. Пекин (теплый климат промышленной атмосферы) и г. Ваньнин (теплый приморский влажный климат). Ускоренные коррозионные испытания проводили в камере солевого тумана при температуре 35 °С с распылением 5%-ного раствора NaCl.

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

Результаты и обсуждение

В первую очередь определяли степень опасности контактов алюминиевого сплава с разнородными материалами (углепластиком, титановым сплавом и нержавеющей сталью). На рис. 3 приведено графическое изображение метода определения плотности тока и потенциала контактных пар с использованием АПК и КПК на примере контакта алюминиевого сплава 1163-Т и углепластика ВКУ-25 в 3%-ном растворе NaCl. Для углепластика снимали КПК, поскольку в данной паре он является катодом, для сплава 1163-Т – соответственно АПК. По точке пересечения кривых на рис. 3 определено значение плотности тока контактной пары. Полученные значения разности потенциалов коррозии анодного (сплав 1163-Т) и катодного материалов, а также плотности тока выбранных контактных пар представлены в табл. 1.

Несмотря на то что значения разности потенциалов коррозии контактных пар достаточно близки, величины плотностей тока контактной коррозии значительно различаются.

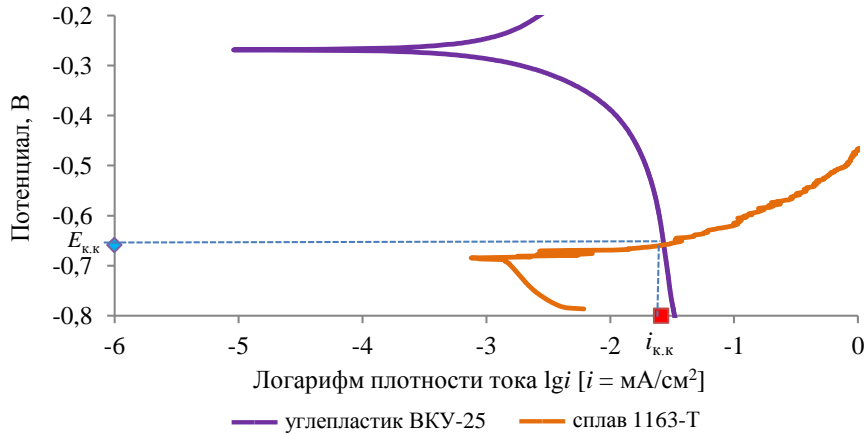


Рис. 3. Определение плотности тока и потенциала контактной коррозии на примере алюминиевого сплава 1163-Т и углепластика ВКУ-25 в 3%-ном растворе NaCl графическим методом

Таблица 1

Параметры контактной коррозии алюминиевого сплава 1163-Т в 3%-ном растворе NaCl

Контактная пара для сплава 1163-Т	Разность потенциалов ΔE , В	Плотность тока $i_{к,к}$, мкА/см ²	$i_{к,к(M-Al)}/i_{к,к(Ti-Al)}$
Сплав ВТ6	0,58	1,1	1
Углепластик ВКУ-25	0,42	13,5	12,3
Сталь 12Х18Н10Т	0,55	47,6	43,3

В табл. 1 также приведены отношения плотностей тока контактной пары «материал–алюминиевый сплав» $i_{к,к(M-Al)}$ и контактной пары «алюминиевый сплав–титановый сплав» $i_{к,к(Ti-Al)}$. Как видно из данных отношений, наиболее опасен контакт алюминиевого сплава с нержавеющей сталью вследствие наличия никеля, обладающего одним из наиболее низких значений перенапряжения водорода. Контакт алюминиевого сплава с углепластиком менее опасен, чем контакт со сталью, но на порядок опаснее, чем контакт с титановым сплавом. С учетом данного факта, а также увеличивающейся доли углепластиков в конструкции воздушных судов контакт алюминиевых сплавов с углепластиком требует особого внимания с точки зрения эффективности применяемой системы ПКЗ.

Принципы испытаний систем противокоррозионной защиты

Конструкция образцов для испытаний

Для исследования эффективности систем ПКЗ необходимо проводить испытания на образцах, представляющих собой имитацию элемента конструкции воздушных судов с нанесенной системой ПКЗ. Для этого используют КПО – образцы соединений пластин разнородных металлов (в данном случае алюминиевого сплава и углепластика), характерных для конструкции разрабатываемого изделия авиационной техники.

Конструкция КПО должна разрабатываться с привлечением специалистов, проектирующих воздушные суда. При этом необходимо придерживаться принципа экономии материала. Поскольку разработано достаточно большое количество средств и технологий защиты, выбор оптимальной системы ПКЗ потребует проведения испытаний множества типов КПО, что при материалоемкой конструкции приведет к значительным расходам. На рис. 1 и 4 представлены эскизы КПО с применением четырех- и двухболтового соединений для испытаний средств защиты. Для КПО с четырехболтовым соединением характерно еще одно опасное место – зазор между двумя пластинами углепластика.

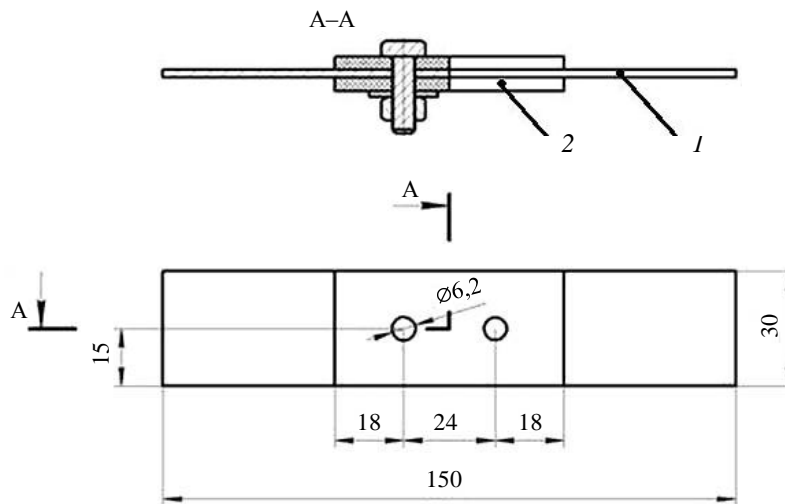


Рис. 4. Эскиз конструктивно-подобного образца с применением двухболтового соединения для испытаний систем противокоррозионной защиты: 1 – алюминиевый сплав; 2 – углепластик

Применение большего количества крепежных элементов в конструкции КПО для испытаний систем ПКЗ нецелесообразно, поскольку ни прочность соединения, ни ее изменение при появлении коррозионных поражений в данных испытаниях не рассматриваются – при появлении первого коррозионного поражения можно говорить о завершении испытаний и, соответственно, фиксировать срок испытаний, определяющий защитную способность.

Методы испытаний для исследования эффективности системы противокоррозионной защиты

Методы испытаний для исследования эффективности систем ПКЗ должны обеспечивать коррозионное воздействие на КПО, имитирующее климатическое воздействие атмосферы. С этой точки зрения наиболее оптимальными являются натурные испытания. Однако они имеют существенный недостаток, заключающийся в продолжительности процесса. Согласно работе [16], современные системы ПКЗ должны обеспечивать защиту изделия авиационной техники в течение срока эксплуатации, превышающего 30 лет. Проведение натурных испытаний для выявления наиболее эффективной системы ПКЗ такой продолжительности нецелесообразно.

В последнее время внедряется метод натурно-ускоренных испытаний [17], заключающийся в ускорении процесса за счет как минимум ежесуточного обрызгивания экспонируемых образцов раствором хлорида натрия. Данный метод при сохранении механизма процессов атмосферной коррозии позволяет увеличить скорость коррозии алюминиевых сплавов до 4 раз. Однако продолжительность такого метода все же достаточно велика, к тому же до сих пор неизвестно, как ускорение процессов влияет на защитную способность систем ПКЗ.

Основным методом ускоренных испытаний, имитирующих коррозионное воздействие атмосферы, является испытание в камере солевого тумана. Метод разработан достаточно давно – в середине прошлого века, однако до сих пор остается золотым стандартом при испытаниях на атмосферную коррозию. Однако получаемые с помощью камеры солевого тумана данные слабо соответствуют результатам натурных испытаний. Для устранения данного недостатка предпринимаются попытки разработать циклические испытания на основе метода испытаний в камере солевого тумана [18]. Анализ применимости методик циклических испытаний представлен в работе [19].

Показано, что каждая методика циклических испытаний зачастую предназначена для конкретного вида материала или покрытия. В частности, циклические испытания, представленные в ГОСТ 9.401–2018 и разработанные для лакокрасочных покрытий, не применимы для испытаний систем ПКЗ, включающих не только лакокрасочные, но и защитные покрытия, герметики, различные противокоррозионные составы.

По результатам данного анализа можно заключить, что для проверки эффективности системы ПКЗ следует использовать испытания в камере солевого тумана. Возможно также применение натуральных испытаний, позволяющих определить ресурс (срок защиты) системы ПКЗ.

*Оценка коррозионного состояния конструктивно-подобного образца
с противокоррозионной защитой после испытаний*

Вопрос оценки изменения свойств КПО после проведения климатических испытаний требует анализа, поскольку определять потери массы образца или время появления коррозионного поражения (момент появления коррозионного поражения на КПО с системой ПКЗ визуально трудно установить, особенно при проведении длительных испытаний) нецелесообразно. Исходя из характерных видов коррозионных поражений, возникающих на алюминиевых сплавах в атмосферных условиях, – питтинговых, межкристаллитных и расслаивающих, можно определить основные показатели коррозии для оценки изменения свойств КПО: максимальную глубину и плотность распространения питтингов, максимальную глубину межкристаллитной коррозии, степень поражения расслаивающей коррозии, изменение уровня усталостных и статических прочностных свойств.

Для решения задачи, представленной в данной статье, в качестве показателей необходимо использовать максимальную глубину питтинговой коррозии и изменение уровня прочностных свойств. Межкристаллитная и расслаивающая коррозии зависят от скорости развития питтинговой коррозии и определяются склонностью сплава (полуфабриката) к данным видам коррозии. Эта задача решается при испытаниях образцов алюминиевого сплава (полуфабриката) в соответствии с ГОСТ, и для КПО такой подход нецелесообразен.

Показатель коррозии по изменению уровня прочностных свойств для КПО можно определить как при статическом K_P , так и при усталостном K_N нагружении согласно уравнениям (1) и (2) по аналогии с показателем коррозии K_σ [20]:

$$K_P = \frac{P_0 - P}{P_0}, \quad (1)$$

$$K_N = \frac{\ln N_0 - \ln N}{\ln N_0}, \quad (2)$$

где P_0 – исходная разрушающая нагрузка; P – разрушающая нагрузка после испытаний; N_0 – исходная усталостная долговечность; N – усталостная долговечность после испытаний при аналогичной усталостной нагрузке.

Для анализа изменения статических прочностных свойств КПО проанализированы коррозионные поражения и изменения прочностных свойств образцов алюминиевого сплава 1163-Т, испытанных при натурной экспозиции в шести климатических зонах в течение 18 мес как отдельно, так и в составе КПО (табл. 2).

Таблица 2

Средние значения удельного изменения массы $\Delta m/S$, глубины питтинговой коррозии h_{\max} и изменения разрушающей нагрузки ΔP образцов алюминиевого сплава 1163-Т, испытанных отдельно и в составе конструктивно-подобного образца (КПО), после натурной экспозиции

Климатическая площадка	Значения свойств образцов, испытанных при экспозиции, мес							
	отдельно						в составе КПО	
	$\Delta m/S$, г/м ²		h_{\max} , мкм		ΔP , %		ΔP , %	
	12	18	12	18	12	18	12	18
г. Лхаса, КНР	0,10	0,12	5	5	2,0	2,3	1,1	1,7
г. Пекин, КНР	0,79	0,95	10	10	4,5	6,2	1,7	2,4
г. Ваньнин, КНР	41,3	55,9	40	50	8,6	12,7	4,9	7,5
г. Якутск	0,11	0,11	5	5	3,6	4,5	1,9	3,0
г. Москва	0,82	0,97	5	10	4,1	6,8	2,1	3,6
г. Геленджик	11,31	13,46	30	35	7,5	12,1	4,6	7,2

Снижение уровня прочностных свойств и разрушающей нагрузки наблюдается только для образцов алюминиевых сплавов после 18 мес экспозиции в приморских регионах: г. Ваньнин и г. Геленджик. При этом заметим, что уменьшение уровня разрушающей нагрузки и, соответственно, степени коррозионных поражений для образцов алюминиевого сплава, испытанных отдельно, больше, чем для образцов в составе КПО, несмотря на наличие в последнем случае контакта разнородных материалов. Причиной данного факта является наличие защитных оксидных покрытий на алюминиевом и титановом сплавах, а также плакировки углепластика стеклопластиком. В случае полной защиты КПО, т. е. применения средств защиты (лакокрасочных материалов, герметиков и т. д.), снижение уровня прочностных свойств будет еще меньше.

С другой стороны, разброс данных при статических испытаниях гораздо меньше, чем при усталостных, поэтому можно предположить, что полученные небольшие значения ΔP будут достаточны для оценки степени коррозионных поражений. Однако с увеличением степени коррозионных поражений разброс данных должен увеличиваться. На рис. 5 представлена зависимость относительной величины разброса данных при статических испытаниях V_R от продолжительности испытаний образцов алюминиевого сплава 1163-Т в камере солевого тумана. Величину V_R рассчитывали как отношение диапазона значений и среднего значения P , выраженное в процентах.

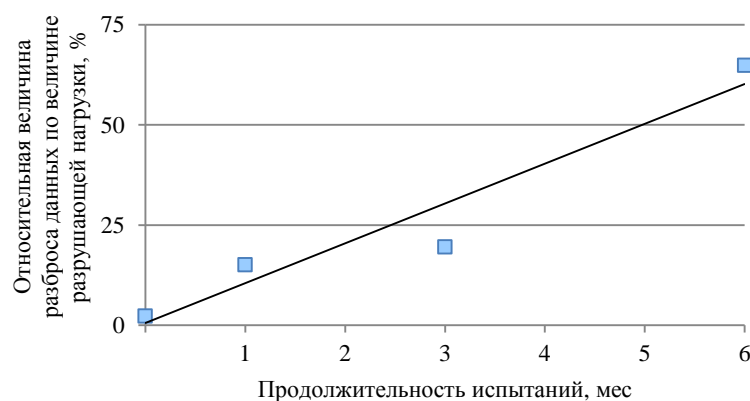


Рис. 5. Зависимость относительной величины разброса данных по величине разрушающей нагрузки для образцов сплава 1163-Т от продолжительности выдержки в камере солевого тумана

Разброс данных увеличивается, что требует наличия значимых различий в величинах K_P . Поскольку значимые изменения K_P наблюдаются лишь для слабых систем ПКЗ и в очень агрессивных условиях испытаний, то подход, основанный на изменении механических свойств при статической нагрузке, следует признать нецелесообразным.

Рассмотрим влияние коррозионных поражений на усталостную долговечность алюминиевых сплавов. На рис. 6 изображена кривая усталостной долговечности образцов из алюминиевого сплава в зависимости от глубины коррозионного поражения, полученная в работе [21]. Коэффициент детерминации достигает высокого значения (0,88), а форма кривой имеет экспоненциальный характер.

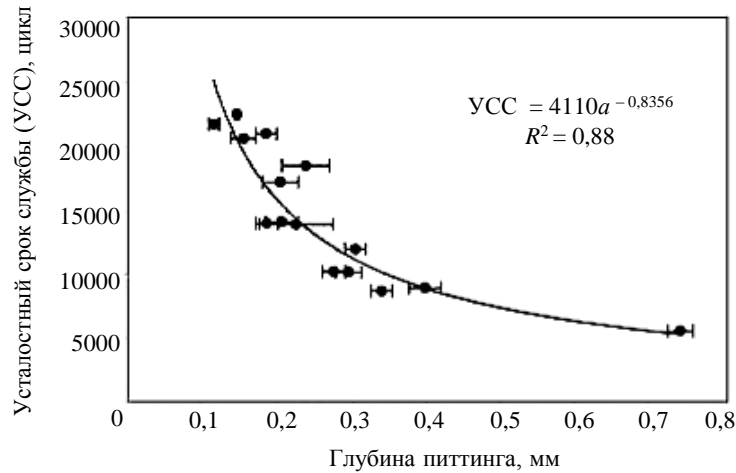


Рис. 6. Зависимость усталостной долговечности от глубины питтинга на образцах из сплава 7075 [21]

На рис. 7 представлена зависимость усталостной долговечности от глубины питтинга в спрямляющих координатах, полученная в работе [22]. Для сравнения на графике также отражено значение усталостной долговечности исходного образца (без коррозионных поражений). Если провести аппроксимирующую кривую, то можно заметить, что при коррозионном поражении «нулевой» глубины значение усталостной долговечности снижается практически на порядок по сравнению с исходным. Полученные данные подтверждают, что даже небольшое коррозионное поражение приводит к значительному уменьшению уровня усталостной долговечности образцов.

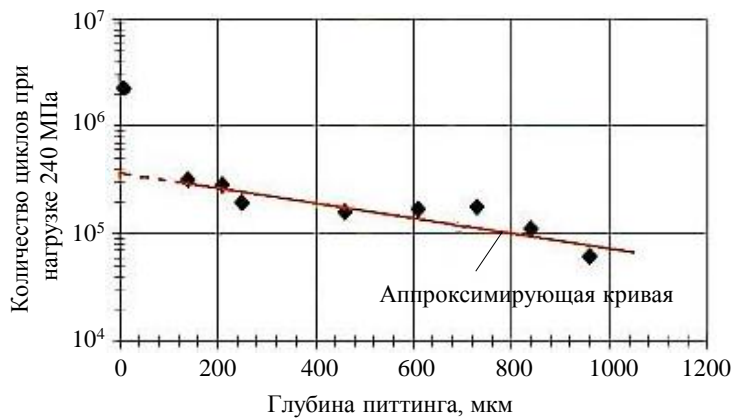


Рис. 7. Зависимость усталостной долговечности от глубины питтинга на образцах из сплава 7075 в спрямляющих координатах [21]

На натурную экспозицию на климатических площадках, указанных в табл. 2, на срок 12 и 18 мес были выставлены КПО с четырехболтовым соединением и различными системами ПКЗ, включающие не только защитные покрытия, но и средства защиты (лакокрасочные материалы, герметики). После окончания экспозиции по результатам визуального осмотра коррозионные поражения не обнаружены. Усталостные испытания показали, что подавляющее количество КПО имеют величину усталостной долговечности в пределах $(2-7) \cdot 10^4$ циклов.

Однако ряд КПО имел достаточно низкие значения усталостной долговечности – порядка 1000 циклов. Алюминиевые части данных КПО подвергнуты фрактографическому анализу и конфокальной спектроскопии. Типичный результат фрактографического анализа для КПО с различными вариантами защиты представлен на рис. 8. Причинами значительного снижения уровня усталостной долговечности исследованных КПО являются многочисленные небольшие дефекты (глубиной до 20 мкм) круглой формы, расположенные по боковым сторонам отверстия, от которых начинается зарождение усталостной трещины. Наблюдается достаточно правильная полусферическая форма данных дефектов, не характерная для коррозионных поражений на алюминиевых сплавах при атмосферной коррозии, – питтинги обладают неправильной формой, их рост идет по преимущественным направлениям к расположению интерметаллидов или сегрегаций легирующих компонентов [3].

Для установления природы появления дефекты исследованы методом рентгеновского микроанализа. При коррозионной природе должны наблюдаться элементы, входящие в состав продуктов атмосферной коррозии алюминия, – в основном хлориды. По результатам анализа в местах дефектов отмечено наличие алюминия, кислорода и углерода. Отсутствие хлора свидетельствует о некоррозионном происхождении данных дефектов.

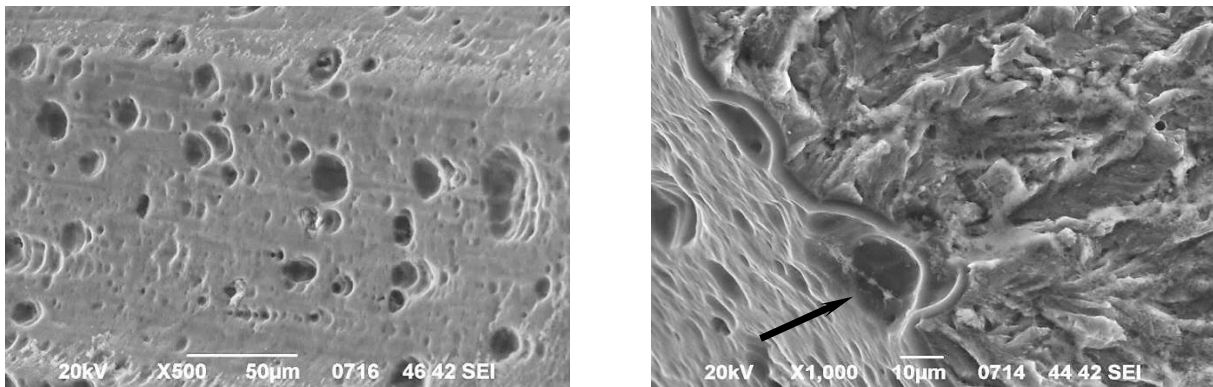


Рис. 8. Типичный результат фрактографического анализа конструктивно-подобного образца после натурной экспозиции и усталостного нагружения

Микроскопическим методом проанализированы поверхности алюминиевых частей КПО с различными вариантами защиты после разборки и удаления лакокрасочных покрытий. Показано, что на поверхности КПО коррозионные поражения отсутствуют. Кроме того, дефекты по боковым сторонам отверстия обнаружены не только на КПО с различными вариантами защиты после испытаний в приморском климате (г. Ваньнин и г. Геленджик), но и на станциях, расположенных в малоагрессивном по отношению к алюминию климате. В случае коррозионной природы глубина дефектов на алюминиевых частях КПО с различными вариантами защиты после испытаний в условиях

приморского климата значительно превышала бы глубину дефектов, возникших после испытания в г. Лхаса.

Можно заключить, что после проведения натуральных, натурно-ускоренных и ускоренных испытаний коррозионные поражения на КПО с различными вариантами защиты отсутствуют. Дефекты образовались, по-видимому, на стадии изготовления КПО с различными вариантами защиты.

В связи с этим после проведения усталостных испытаний необходимо проводить фрактографический анализ изломов образцов как для установления природы зарождения усталостной трещины, так и для определения глубины коррозионного поражения, вызвавшего ее рост. Для алюминиевых сплавов данная величина, как указано в работе [23], обычно меньше максимальной глубины коррозионного поражения.

Заключения

Разработан алгоритм оценки влияния коррозионных поражений:

- визуальный осмотр КПО на предмет нарушения целостности покрытия и наличия коррозионных поражений. Фиксирование деградации защитных покрытий и наличия продуктов коррозии;
- усталостные испытания КПО (малоцикловая усталость) с фиксацией количества циклов до разрушения;
- удаление лакокрасочных покрытий за счет нанесения специальных составов, которые не вызывают коррозии на материалах составных частей КПО;
- определение максимальной глубины коррозии методом конфокальной спектроскопии на разрушенных частях КПО (при наличии коррозионных поражений);
- фрактографический анализ разрушенной части КПО, который имеет минимальное значение долговечности среди партии испытанных КПО, с определением глубины коррозионного поражения, вызвавшего зарождение усталостной трещины и разрушение образца.

Список источников

1. Сагитов И.Ф. Композиционные материалы в современном авиастроении // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2017. Т. 2. с. 480–490.
2. Каблов Е.Н., Каримова С.А., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 12. С. 1–7.
3. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1969. 448 с.
4. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1986. 76 с.
5. Zhang W., Frankel G.S. Transition between pitting and intergranular corrosion in AA2024 // Electrochimica Acta. 2003. Vol. 48. P. 1193–1210.
6. Findlay S.J., Harrison N.D. Why aircraft fail // Materials Today: Materials feature. 2002. Vol. 5. No. 11. P. 18–25.
7. Громов М.С., Шапкин В.С. Особенности поддержания летной годности экземпляра ВС в условиях безремонтной эксплуатации // Научный вестник МГТУ ГА. Серия Аэромеханика и прочность, поддержание летной годности ВС. 2006. № 103. С. 713.
8. Kinzie R.C. USAF Cost of Corrosion Maintenance // Sixth Joint FAA/DoD/NASA Conference on Aging Aircraft. San Francisco CA, 2002. P. 35.
9. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 187. С. 83–91.

10. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Вдовин А.И. Разработка раствора для нанесения коррозионных поражений на алюминиевых сплавах в гальваностатическом режиме // Труды ВИАМ. 2018. № 9 (69). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.06.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
11. Кузякина В.А., Толеуханов А.Д. Проблема перехода на систему ремонта воздушного судна по фактическому техническому состоянию // Прогрессивные технологии в транспортных системах. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2019. С. 332–336.
12. 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.
13. Чайкун А.М., Венедиктова М.А., Смирнов Д.Н., Герасимов Д.М. Исследование влияния атмосферных факторов на основные характеристики герметизирующих материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.08.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-58-67.
14. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Новикова Т.А. Исследование свойств системы лакокрасочного покрытия на основе фторполиуретановой эмали и грунтовки с пониженным содержанием токсичных пигментов // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.07.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-68-75.
15. 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: 20.11.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
16. Садков В.В., Миркин И.И. Обеспечение коррозионной стойкости алюминиевых конструкций в самолетах «Ту» // Цветные металлы. 2006. № 11. С. 73–76.
17. Курс М.Г., Каримова С.А. Натурно-ускоренные испытания: особенности методики и способы оценки коррозионных характеристик алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 1. С. 51–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-51-57.
18. Simpson C.H., Ray C.J., Skerry B.S. Accelerated Corrosion Testing of Industrial Maintenance Paints Using a Cyclic Corrosion Weathering Method // Journal of Protective Coatings and Linings. 1991. Vol. 8. No. 5. P. 2836.
19. Кутырев А.Е., Фомина М.А., Чесноков Д.В. Разработка метода циклических коррозионных испытаний, имитирующих натурную экспозицию алюминиевых сплавов в условиях приморской атмосферы. Ч. 1. Основные принципы // Коррозия: материалы, защита. 2019. № 10. С. 35–42.
20. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.
21. DuQuesnay D.L., Underhill P.R., Britt H.J. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminium alloy under aircraft loading // International Journal of Fatigue. 2003. Vol. 25. No. 5. P. 371–377.
22. Mills T., Sharp P.K., Loader C. The incorporation of pitting corrosion damage into F-111 fatigue life modeling. Canberra (Australia): Defense science and technology organization, 2002. 138 p.
23. Sprowls D.O. Evaluation of pitting corrosion // ASM Handbook. ASM International, 1987. Vol. 13: Corrosion. P. 516–521.

References

1. Sagitov I.F. Composite materials in modern aircraft construction. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики*, 2017, vol. 2, pp. 480–490.
2. Kablov E.N., Karimova S.A., Semenova L.V. Corrosion activity of carbon fiber reinforced plastics and protection of metal load-bearing structures in contact with carbon fiber reinforced plastics. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2011, no. 12, pp. 1–7.

3. Rosenfeld I.L. *Corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgy, 1969, 448 p.
4. Sinyavsky V.S., Valkov V.D., Kalinin V.D. *Corrosion and protection of aluminum alloys*. Moscow: Metallurgy, 1986, 76 p.
5. Zhang W., Frankel G.S. Transition between pitting and intergranular corrosion in AA2024. *Electrochimica Acta*, 2003, vol. 48, pp. 1193–1210.
6. Findlay S.J., Harrison N.D. Why aircraft fail. *Materials Today: Materials feature*, 2002, vol. 5, no. 11, pp. 18–25.
7. Gromov M.S., Shapkin V.S. Features of maintaining the airworthiness of an aircraft in conditions of maintenance-free operation. *Nauchnyy vestnik MGTU GA. Seriya Aeromekhanika i prochnost, podderzhaniye letnoy godnosti VS*, 2006, no. 103, p. 713.
8. Kinzie R.C. USAF Cost of Corrosion Maintenance. *Sixth Joint FAA/DoD/NASA Conference on Aging Aircraft*. San Francisco CA, 2002, p. 35.
9. Feigenbaum Yu.M., Dubinsky S.V. The influence of accidental operational damage on the strength and service life of aircraft structures. *Scientific Bulletin of MSTU GA*, 2013, no. 187, pp. 83–91.
10. Kutuyev A.E., Chesnokov D.V., Antipov V.V., Vdovin A.I. The development of a solution for promotion of corrosion attack on aluminium alloys in a galvanostatic mode. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 15, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
11. Kuzyakina V.A., Toleukhanov A.D. The problem of transition to an aircraft repair system based on the actual technical condition. *Advanced technologies in transport systems*. Orenburg: Orenburg State Univ., 2019, pp. 332–336.
12. 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.
13. Chaykun A.M., Venediktova M.A., Smirnov D.N., Gerasimov D.M. Features of the influence of atmospheric factors on the main technical characteristics of sealing materials of various types of aviation purposes. *Trudy VIAM*, 2019, no. 2 (74), paper no. 06. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: August 07, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-58-67.
14. Merkulova Yu.I., Kuznetsova V.A., Novikova T.A. Investigation of properties of coating system based on fluorine polyurethane enamel and primer with low toxic pigment content. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 15, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-68-75.
15. 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: November 20, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-101-110.
16. Sadkov V.V., Mirkin I.I. Ensuring corrosion resistance of aluminum structures in Tu aircraft. *Non-ferrous metals*, 2006, no. 11, pp. 73–76.
17. Kurs M.G., Karimova S.A. Salt-accelerated outdoor corrosion testing: methodology and evaluation of corrosion susceptibility of aluminum alloy. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 51–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-51-57.
18. Simpson C.H., Ray C.J., Skerry B.S. Accelerated Corrosion Testing of Industrial Maintenance Paints Using a Cyclic Corrosion Weathering Method. *Journal of Protective Coatings and Linings*, 1991, vol. 8, no. 5, p. 2836.
19. Kutuyev A.E., Fomina M.A., Chesnokov D.V. Development of a method of cyclic corrosion tests simulating natural exposure of aluminum alloys in a coastal atmosphere. Part 1. Basic principles. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2019, no. 10, pp. 35–42.
20. Zhuk N.P. *Course on the theory of corrosion and protection of metals*. Moscow: Metallurgy, 1976, 472 p.

21. DuQuesnay D.L., Underhill P.R., Britt H.J. Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminium alloy under aircraft loading. *International Journal of Fatigue*, 2003, vol. 25, no. 5, pp. 371–377.
22. Mills T., Sharp P.K., Loader C. *The incorporation of pitting corrosion damage into F-111 fatigue life modeling*. Canberra (Australia): Defense science and technology organization, 2002, 138 p.
23. Sprowls D.O. *Evaluation of pitting corrosion*. *ASM Handbook*. ASM International, 1987, vol. 13: Corrosion, pp. 516–521.

Информация об авторах

Кутырев Алексей Евгеньевич, ведущий научный сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Антипов Владислав Валерьевич, заместитель генерального директора по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

Alexey E. Kutyrev, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Vladislav V. Antipov, Deputy Director General for Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 29.11.2023.

The article was submitted 28.11.2023; approved and accepted for publication after reviewing 29.11.2023.