

Научная статья

УДК 620.1:667.6

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-135-146

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ

А.Е. Кутырев¹, А.А. Кривушина¹, А.И. Вдовин¹

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

Аннотация. Показана необходимость разработки методики комплексных испытаний систем противокоррозионной защиты изделий авиационной техники, которая учитывает воздействие не только климатических факторов, но и микробиологических и эксплуатационных. Последние факторы негативно воздействуют на систему противокоррозионной защиты, что может привести к ее разрушению и, соответственно, развитию коррозионных поражений. Определены контуры указанной методики, разработана программа испытаний, которая необходима для ее создания.

Ключевые слова: противокоррозионная защита, ускоренные испытания, контактная коррозия, грибостойкость, микробиологические повреждения, знакопеременные нагрузки функционирования

Для цитирования: Кутырев А.Е., Кривушина А.А., Вдовин А.И. Разработка программы испытаний систем противокоррозионной защиты воздушного судна с учетом воздействия эксплуатационных факторов // Труды ВИАМ. 2025. № 11 (153). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-135-146.

Scientific article

DEVELOPMENT OF A TEST PROGRAM FOR AIRCRAFT ANTICORROSIVE PROTECTION SYSTEMS OF WITH ACCOUNT OF OPERATIONAL FACTORS

A.E. Kutyrev¹, A.A. Krivushina¹, A.I. Vdovin¹

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 article demonstrates the necessity of developing a methodology for complex testing of aircraft anticorrosive protection systems, which considers the impact of the climatic factors, alongside with the microbiological and operational ones. The latter negatively affect the anticorrosive protection system, which can lead to its destruction, and, consequently to, the development of corrosion damage. The framework of this methodology has been determined, as well as test program required for its development has been created.

Keywords: anticorrosive protection, accelerated tests, galvanic corrosion, fungal resistance, microbiological damage, alternating operational loads

For citation: Kutyrev A.E., Krivushina A.A., Vdovin A.I. Development of a test program for aircraft anticorrosive protection systems of with account of operational factors. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-135-146.

Введение

Создание конкурентоспособного на мировом рынке нового самолета, превосходящего существующие изделия гражданской авиационной техники по показателям эффективности (календарный срок службы, повышенный ресурс, сниженные масса и расход топлива), невозможно без применения новых технологий и конструктивных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками [1, 2]. Однако использование новых материалов приводит к появлению дополнительных вопросов, связанных с сохраняемостью их свойств при эксплуатации, прежде всего, вследствие протекания процессов коррозии [3] и старения [4].

Защита самолетов от коррозии является сложной комплексной задачей, решение которой имеет особое значение для обеспечения надежности при длительной эксплуатации, особенно в районах с морским климатом. Применение в конструкции планера углепластиков, обладающих рядом ценных свойств, создает высокую опасность возникновения контактной коррозии в соединениях с алюминиевыми сплавами, вызывая ускоренную деградацию их механических свойств [5], что может отразиться на безопасности эксплуатации нового самолета и увеличении эксплуатационных расходов [6].

Для предотвращения контактной коррозии необходимо обеспечить надежную защиту в местах соединений, что реализуется благодаря применению противокоррозионной защиты (ПКЗ). Для решения данной задачи важно использовать современные средства ПКЗ и проводить комплексные испытания, позволяющие определить эффективность защиты. Для проведения испытаний необходим подход, обеспечивающий максимально полную имитацию условий эксплуатации. Современные тенденции развития климатических испытаний для обеспечения безопасной эксплуатации воздушных судов направлены в том числе на анализ изменения свойств материала при воздействии как климатических, так и эксплуатационных факторов [7].

Система ПКЗ воздушного судна подвергается различным воздействиям внешних факторов, возникающим при эксплуатации, таким как знакопеременные нагрузки и микроорганизмы, особенно микроскопические грибы, или микромицеты. Эти факторы могут негативно влиять на эффективность системы ПКЗ и, наряду с климатическими факторами (влажность, температура, аэрохимические параметры), создают условия для протекания коррозионных процессов. В местах контакта разнородных материалов, особенно алюминиевого сплава и углепластика, это может вызвать активное развитие коррозионных поражений, что приведет к значительному снижению уровня механических свойств материалов и, соответственно, к угрозе целостности конструкции воздушного судна.

Вследствие этого необходимо разработать методику проведения испытаний систем защиты от контактной коррозии с использованием предварительного усталостного нагружения и микологического воздействия, которая позволит оценить эффективность ПКЗ в условиях, приближенных к эксплуатационным. Подобный подход, касающийся совместного воздействия климатического, биологического и эксплуатационного факторов, при испытаниях различных материалов в той или иной степени отражен в научно-технической литературе [8, 9].

Вопросы, связанные с разработкой методики испытаний системы ПКЗ, также рассмотрены в работе [10], в которой определен алгоритм оценки коррозионных поражений после проведения испытаний конструктивно-подобных образцов (КПО). Однако сами процессы нанесения коррозионных поражений не рассмотрены. Для разработки методики испытаний систем ПКЗ необходимо провести ряд исследований, которые позволят установить необходимость и достаточность того или иного испытания, имитирующего воздействие эксплуатационного фактора.

Данная работа посвящена разработке перечня необходимых исследований, а также программы определения параметров и периодичности проведения испытаний, имитирующих воздействие различных эксплуатационных факторов, в рамках будущей методики испытаний систем ПКЗ.

Материалы и методы

Для изготовления КПО использованы листы из алюминиевых сплавов 1163-АТ и В95пч-Т2 толщиной 1,2 и 1,8 мм соответственно. Образцы алюминиевых сплавов сначала анодировали в сернокислотном электролите с уплотнением в водном растворе бихромата калия. После чего наносили грунт АК-070 или ЭП-0215М, далее проводили сверление отверстий.

Перед покраской поверхность деталей из алюминиевого сплава обезжировали с помощью марлевых салфеток, смоченных нефрасом-С2-80/120 с добавлением антистатической присадки АСП-3 в количестве от 0,0020 до 0,0025 %. Методом пневматического распыления наносили один слой грунтовки ЭП-0215М или АК-070 на обе стороны пластины из алюминиевого сплава. Сушили при температуре 100 ± 3 °С в течение 2 ч. Толщина слоя грунтовки составила 20 мкм.

Для получения КПО также использовали углепластик ВКУ-25 на основе жгута УМТ49S-12К-ЕР, плакированный препрегом стеклопластика ВПС-48/7781. Для защиты углепластика применяли один слой выравнивающей грунтовки ЭП-0104. Поверхность деталей из углепластика перед нанесением грунтовки тщательно зачищали шкуркой зернистостью не более 20 до полного удаления глянца, а затем обезжировали с помощью марлевых салфеток, смоченных нефрасом-С2-80/120 с добавлением антистатической присадки АСП-3 в количестве от 0,0020 до 0,0025 %. Грунтовку наносили методом пневматического распыления (с обеих сторон). Сушили при температуре 50 ± 3 °С в течение 1 ч. Толщина слоя грунтовки составила 20 мкм.

В качестве крепежа использовали анодированный титановый сплав ВТ16 (Ан.Окс.имп). Крепеж устанавливали на пасту ВЗП-1 или на жидкую грунтовку ЭП-0215. Постановку крепежа на грунтовку проводили методом погружения. Антикоррозионную пасту ВЗП-1 наносили на сопрягаемые поверхности крепежных деталей с помощью колонковой кисти. Перед постановкой крепежа на сопрягаемые поверхности (отверстия под крепежные детали) наносили один слой пасты ВЗП-1 и сушили при комнатной температуре в течение 15 мин. Затем колонковой кистью наносили второй слой пасты ВЗП-1 методом «сырой по сырому», сушку осуществляли при комнатной температуре в течение 12 ч. Крепеж устанавливали с помощью динамометрического ключа с усилием 10 Н·м.

В местах нахлеста пластин углепластика с алюминиевой пластиной наносили жгутовый герметик У32-НТ либо герметик ВИТЭФ-1НТ; КПО покрывали эмалями ЭП-140 или ВЭ-69.

Механические свойства КПО, а именно прочность (или несущую нагрузку) и количество циклов до разрушения, определяли на испытательной машине. Испытания на малоцикловую усталость проводили при коэффициенте асимметрии $R_\sigma = 0,1$, частоте $f = 5$ Гц и нескольких величинах максимальной усталостной нагрузки, которые составили 0,50–0,95 от величины прочности.

Для определения микромицетов, наиболее агрессивных по отношению к средам ПКЗ, которые необходимо использовать при испытании на микологическое воздействие, изготовлены образцы из герметиков в виде лопаток двух марок: УТ-32НТ и ВИТЭФ-1НТ. Выбраны шесть микромицетов, которые наиболее часто вызывают биоповреждения неметаллических материалов и изделий:

- *Aspergillus flavus*;
- *Aspergillus niger*;
- *Aspergillus terreus*;
- *Paecilomyces variotii*;
- *Penicillium funiculosum*;
- *Trichoderma viride*.

Все шесть видов используются в качестве тест-культур при проведении испытаний согласно ГОСТ 9.049–91 «Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов» и ГОСТ 9.048–89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов».

Культуры микромицетов предварительно выращивали на чашках Петри с питательной средой сусло-агар в течение 7 сут (каждый вид на отдельной чашке). Далее в чашки Петри помещали образцы герметиков, предварительно простерилизованные ватным тампоном с этиловым спиртом. Чашки Петри с образцами и микромицетами помещали в термостат с температурой 28 ± 2 °С и инкубировали в течение 14 сут. После истечения срока испытаний образцы извлекали из чашек; очищали от мицелия и остатков питательной среды; дезинфицировали с помощью ватных тампонов, смоченных в этиловом спирте; просушивали на воздухе при комнатной температуре в течение 5 ч.

Условную прочность, относительное удлинение при разрыве и остаточную деформацию после разрыва определяли по ГОСТ 21751–76 на разрывной машине при скорости движения подвижного зажима 500 ± 20 мм/мин.

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

Результаты и обсуждение

Определение перечня воздействий при комплексных испытаниях системы противокоррозионной защиты

Для определения подходов к методике испытаний систем ПКЗ прежде всего необходимо рассмотреть основные внешние факторы, воздействующие на систему ПКЗ:

– климатический фактор, заключающийся в проникновении к поверхности металлических материалов влаги и коррозионно-агрессивных компонентов, вызывающих коррозионные поражения. Это основной фактор, влияющий на систему ПКЗ, и единственный фактор, на стойкость к которому проводятся испытания на ПКЗ. Указанные испытания обычно проводятся в камере соляного тумана (КСТ). Наиболее точные результаты получают при проведении натурных испытаний, которые имеют существенный недостаток – длительность [11]. Результаты испытаний в КСТ не всегда соответствуют результатам натурных испытаний, несмотря на наличие исследований, в которых отмечается хорошая корреляция данных, полученных при использовании обоих подходов [12]. Для более точного выбора технологий нанесения защитных покрытий рекомендуется применение и других методик испытаний на атмосферную коррозию, в частности циклических испытаний, которые в последнее время активно разрабатываются [13, 14]. Однако это резко увеличивает стоимость испытаний. Как следствие, в основном используются испытания в КСТ, результаты которых позволяют с высокой вероятностью оценить коррозионное воздействие в атмосфере;

– микробиологический фактор, заключающийся в воздействии микроорганизмов, которые, как отмечено в работе [15], вызывают сильную коррозию алюминиевых сплавов.

Однако в рамках данной работы наиболее важно воздействие микроорганизмов на средства системы ПКЗ, в основном на герметизирующие материалы [16]. Данный фактор обычно учитывают при разработке герметиков, проводя испытания на микробиологическую стойкость (например, по ГОСТ 21751–76). Однако комплексное воздействие микробиологического и климатического факторов может быть реализовано лишь при натурных испытаниях и в силу длительности процессов воздействия микроорганизмов малоизучено. Например, в работе, посвященной изучению воздействия микроорганизмов на коррозию металлических материалов в морской воде [17], отмечается продолжительный инкубационный период. Вследствие этого микробиологический фактор необходимо обязательно учитывать при разработке ускоренных комплексных испытаний систем ПКЗ. С учетом большей агрессивности микромицетов по сравнению с бактериями микробиологическое воздействие можно представить только микологическим влиянием;

– эксплуатационный фактор, заключающийся в воздействии знакопеременных нагрузок функционирования. Воздействие данного фактора может привести к возникновению коррозионно-усталостного разрушения [18], а также может иметь косвенное влияние. Например, в работах [19, 20] показано, что склонность к локальным видам коррозии и электрохимическое поведение алюминиевых сплавов изменяются под влиянием знакопеременных нагрузок функционирования. Однако, как и в случае с микробиологическим фактором, необходимо рассмотреть его воздействие только на систему ПКЗ. При высокоамплитудных нагрузках, особенно в местах контакта, в случае применения средств ПКЗ с невысоким уровнем эластичности и адгезии к поверхности металлических материалов может произойти разрушение ее целостности. Это приведет к доступу влаги к металлической поверхности. При наличии контакта разнородных материалов коррозионные поражения могут развиваться с высокой скоростью, приводя к нарушению целостности конструкции. Вследствие этого при испытании систем ПКЗ следует учитывать воздействие знакопеременных нагрузок.

Определение очередности воздействий при комплексных испытаниях системы противокоррозионной защиты

С учетом изложенного можно заключить, что необходимо проводить комплексные испытания систем ПКЗ, включающие имитацию воздействия трех перечисленных факторов. Исходя из невозможности или значительных ограничений проведения ускоренных испытаний, в которых одновременно осуществляются все указанные воздействия, необходимо проводить их по очереди. Первоначально надо установить очередность их воздействия на систему ПКЗ.

В этом случае климатическое воздействие (испытание в КСТ) должно быть последним, поскольку именно оно должно выявить поврежденные или ослабленные участки системы ПКЗ, вызывая визуально определяемые очаги коррозии. Наиболее перспективным с этой точки зрения является следующий порядок испытаний:

– микологическое воздействие, в процессе которого могут ухудшаться прочностные свойства герметизирующих материалов;

– усталостная наработка, которая может привести к более серьезным повреждениям системы ПКЗ, в частности к отрыву герметизирующего слоя от металлической поверхности;

– выдержка в КСТ.

Следует заметить, что для более агрессивного микологического воздействия необходимо провести тепловлажностное старение путем выдержки образцов в камере тепла и влаги (КТВ). Однако необходимо экспериментально подтвердить предлагаемый порядок испытаний, рассмотрев и другие очередности воздействия, представленные в табл. 1.

Варианты проведения разрабатываемых комплексных испытаний систем противокоррозионной защиты в зависимости от порядка их проведения

Вариант комплексных испытаний	Испытание			
	1	2	3	4
1	КТВ	Микологическое	Усталостная наработка	КСТ
2	Усталостная наработка	КТВ	Микологическое	КСТ
3	КТВ	Микологическое	Частичное периодическое нагружение совместно с испытанием в КСТ	

Примечание. КТВ – камера тепла и влаги; КСТ – камера соляного тумана.

Вариант 2 (табл. 1) обусловлен предположением, что в процессе микробиологического воздействия эластичность герметизирующего средства может увеличиться, что благоприятно скажется на стойкости к знакопеременным нагрузкам. Вариант 3 предполагает возможность увеличения агрессивности испытаний при одновременном воздействии нагрузок и климатических факторов.

Определение типа образцов для проведения комплексных испытаний системы противокоррозионной защиты и материалов для их изготовления

Для проведения испытаний используются образцы с нанесенной системой ПКЗ. При этом основное внимание уделяется соединениям разнородных материалов, в которых наиболее вероятно возникновение коррозионных поражений. В этом случае необходимо применять образцы соединений, характерные для авиационной техники, или КПО. На рис. 1 представлен эскиз КПО, представляющего собой простейшее болтовое соединение двух разнородных материалов – алюминиевого сплава и углепластика (взамен углепластика может применяться любой другой материал, вызывающий контактную коррозию алюминиевых сплавов, в частности нержавеющая сталь, титановый сплав).

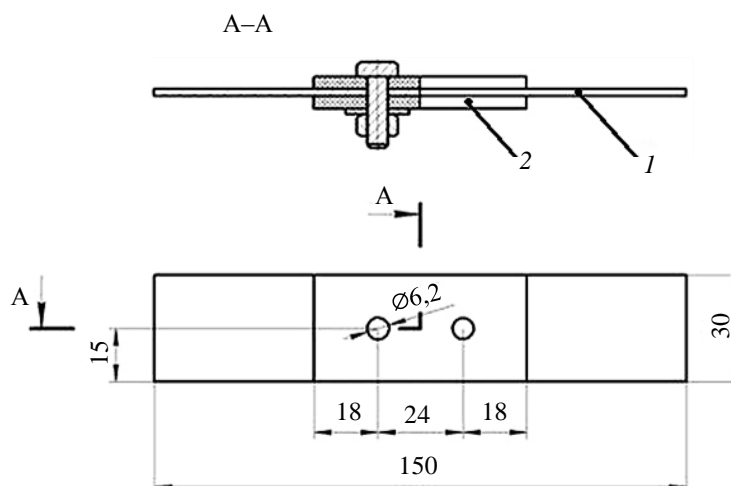


Рис. 1. Эскиз конструктивно-подобного образца: 1 – анод (алюминиевый сплав); 2 – катод (углепластик)

Данный тип КПО можно подвергать усталостным нагрузкам, причем в отличие от конструкций КПО, в которых центральная пластина алюминиевого сплава состоит из двух частей, разброс данных по усталостным характеристикам будет значительно

меньше. Это позволяет использовать в качестве критерия коррозионной повреждаемости КПО снижение усталостных характеристик, что важно для авиационных материалов. Кроме того, используя фрактографический анализ, можно определить глубину коррозионного поражения, откуда произошла усталостная трещина. Здесь следует заметить тот факт, что такой подход к методологии испытаний КПО не относится к проблеме коррозионно-усталостного разрушения, а определяет влияние коррозионного поражения на изменение усталостных характеристик. Для авиационной отрасли это имеет особое значение, поскольку коррозионные поражения в воздушном судне преимущественным образом развиваются во время его стоянки, а знакопеременные нагрузки воздействуют при полете.

Для проведения испытаний выбраны две произвольные системы ПКЗ с применением различных материалов и технологий защиты, которые будут использоваться при изготовлении КПО. Указанные системы ПКЗ представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Перечень материалов и технологий систем противокоррозионной защиты (ПКЗ)
для двух типов конструктивно-подобного образца (КПО)
с различной защитной способностью**

Способ подготовки КПО	Материалы и технологии системы ПКЗ для КПО	
	типа 1 (система ПКЗ 1)	типа 2 (система ПКЗ 2)
Защита алюминиевого сплава	Ан.Окс.нхр	
Защита титанового крепежа	Ан.Окс.имп	
Защита углепластика	Стеклопластик + ЭП-0104	
Постановка крепежа	ЭП-0215	ВЗП-1
Обработка кромок	У32-НТ	ВИТЭФ-1НТ
Система окраски	АК-070 + ЭП-140	ЭП-0215М (ЭП-0104) + ВЭ-69

При этом заметим, что система ПКЗ 2 исходя из свойств применяемых средств более эффективна, чем система ПКЗ 1, по следующим причинам:

- грунтовка ЭП-0215М обладает более высоким уровнем защитных свойств по сравнению с грунтовкой АК-070;
- средство для постановки крепежа ВЗП-1 более эффективно по сравнению с грунтовкой ЭП-0215;
- герметик ВИТЭФ-1НТ более устойчив к микологическому воздействию, чем герметик У32-НТ.

Заметим, что ряд технологий и материалов в двух различных системах ПКЗ совпадает – использованы обязательные технологии защиты материалов в авиационной отрасли согласно положениям ОСТ 1 90368–86 «Самолеты и вертолеты. Выбор металлических материалов и покрытий для противокоррозионной защиты».

Определение параметров испытаний

Поскольку испытания в КТВ предназначены для первоначального повреждения средств ПКЗ, в дальнейшем подвергаемых микологическому воздействию, режим испытаний в КТВ выбирается исходя из условий, наиболее благоприятных для последующего развития микроорганизмов и наиболее часто применяемых при испытаниях на микробиологическую стойкость. Выбраны следующие параметры испытаний в КТВ: влажность 90±5 %, температура 28±2 °С, длительность 30 сут.

Выбрать параметры испытаний в КСТ также просто. Они соответствуют параметрам испытаний алюминиевых сплавов, приведенных в ГОСТ 9.913–90: влажность 98 %, температура 35 °С, распыление 5%-ного водного раствора NaCl.

Основные вопросы касаются параметров испытаний на воздействие знакопеременных нагрузок и микологическое воздействие.

Для предварительного циклического нагружения КПО необходимо подобрать такие величины усталостной нагрузки и количество циклов, чтобы не допустить их разрушения. При этом выбор величины усталостной нагрузки определялся следующими факторами:

- нагрузка КПО должна проводиться в области малоциклового усталости;
- величина нагрузки должна быть достаточно большой, чтобы создать условия для микроперемещения в местах как постановки крепежного соединения, так и нахлеста пластин КПО, которые могли бы привести к повреждению системы защиты;
- величина нагрузки не должна быть завышенной, чтобы осуществить воздействие при достаточном количестве циклов (в области малоциклового усталости) без разрушения КПО.

Первоначально использовали два уровня усталостной нагрузки с тем условием, чтобы образец не разрушился после 10^4 и 10^5 циклов. Применяли КПО с габаритными размерами 30×150 мм. Получена зависимость величины усталостной нагрузки от количества циклов до разрушения КПО. Величину усталостной нагрузки для получения указанной зависимости выбирали исходя из значений разрушающей нагрузки при статическом нагружении КПО P_{\max} . Для КПО на основе сплава 1163-АТ данная величина равна 11,3 кН, а для КПО на основе сплава В95пч-Т2 составляет 21,9 кН. Данные для КПО на основе обоих сплавов представлены на рис. 2.

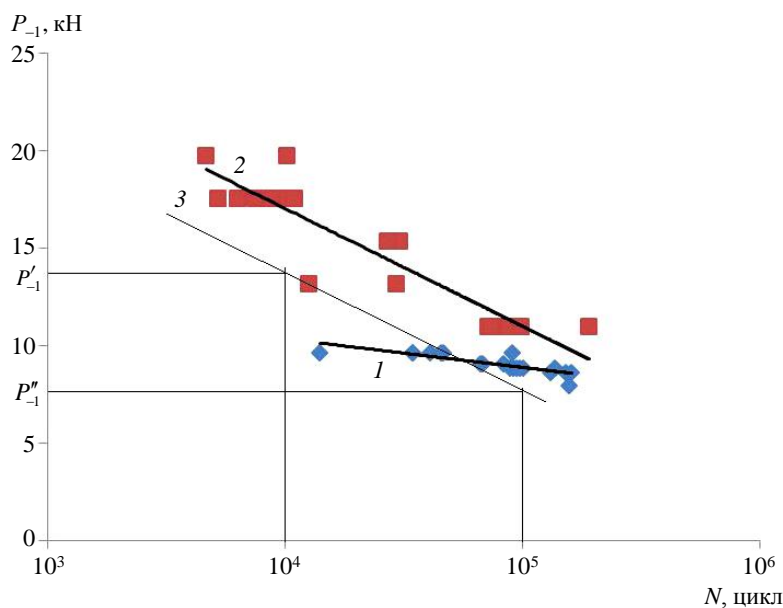


Рис. 2. Зависимости величины усталостной нагрузки (P_{-1}) от количества циклов до разрушения (N) конструктивно-подобных образцов на основе сплавов 1163-АТ (1) и В95пч-Т2 (2); пример кривой для определения значений усталостной нагрузки (3)

Уровни усталостной нагрузки определяли по полученной зависимости следующим образом:

- получали уравнение аппроксимирующей кривой;
- строили параллельную зависимость полученного уравнения с условием пересечения значения P_{-1} с максимальным удалением от аппроксимирующей кривой по минимальным значениям – кривая 3 на рис. 2;

– из полученной зависимости, построенной по минимальному значению, определяли минимальные значения усталостной нагрузки при количестве циклов 10^4 и 10^5 (P'_{-1} и P''_{-1} соответственно);

– уровни нагрузки определяли как 0,8 от величины полученных минимальных значений P'_{-1} и P''_{-1} .

В итоге получили по два значения усталостной нагрузки для КПО на основе сплавов 1163-АТ (7,25 и 6,35 кН) и В95пч-Т2 (11,05 и 5,95 кН) для проведения нагружения при количестве циклов 10^4 и 10^5 соответственно.

Для выбора режимов микологического воздействия и подбора микромицетов, наиболее агрессивных к средствам противокоррозионной защиты, изготовлены образцы из герметиков двух марок: УТ-32НТ и ВИТЭФ-1НТ.

Внешний вид образцов из герметиков при испытании в чашках Петри на агаризованной питательной среде с культурами микромицетов представлен на рис. 3. Образцы из герметиков при данном типе испытаний экспонируются в условиях наиболее жесткого воздействия микромицетов, поскольку активный рост микроорганизмов происходит за счет компонентов подложки из агаризованной питательной среды. Образцы в течение всего срока испытания претерпевают механическое воздействие в результате активного роста гиф мицелия микроскопических грибов. Кроме того, образцы испытывают повреждающее химическое воздействие вследствие выделения микромицетами в окружающее пространство вторичных метаболитов, в основном кислот и ферментов.

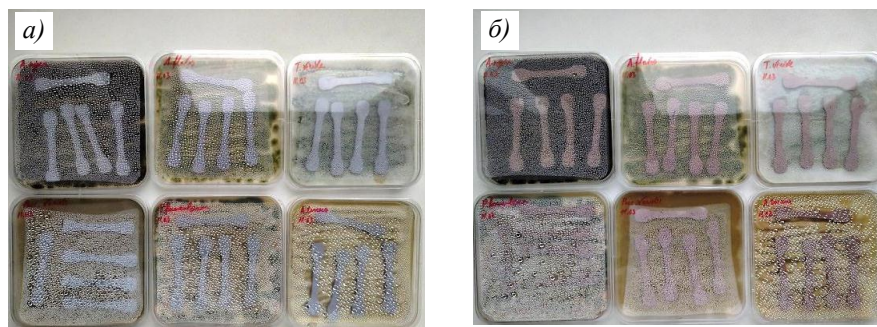


Рис. 3. Образцы из герметиков УТ-32НТ (а) и ВИТЭФ-1НТ (б) в чашках Петри с микромицетами

Далее определены физико-механические характеристики образцов из герметиков после воздействия микромицетов по ГОСТ 21751–76 на разрывной машине при скорости движения подвижного зажима 500 ± 20 мм/мин. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические характеристики образцов из герметиков после воздействия микромицетов

Вид грибов	Условная прочность в момент разрыва, МПа, для образца из герметика		Относительное удлинение в момент разрыва, %, для образца из герметика	
	УТ-32НТ	ВИТЭФ-1НТ	УТ-32НТ	ВИТЭФ-1НТ
–	2,28	2,18	304	306
<i>Aspergillus flavus</i>	1,64	2,02	410	261
<i>Aspergillus niger</i>	1,60	1,80	394	249
<i>Aspergillus terreus</i>	1,70	1,86	410	244
<i>Paecilomyces variotii</i>	1,68	1,72	420	237
<i>Penicillium funiculosum</i>	1,68	1,80	407	246
<i>Trichoderma viride</i>	1,60	1,96	351	246

Значения условной прочности образцов в момент разрыва после воздействия всех шести видов микромицетов отличаются незначительно. Наименьшее значение данной характеристики для образцов из герметика УТ-32НТ отмечено в среде микромицетов *Aspergillus niger* и *Trichoderma viride*, для образцов из герметика ВИТЭФ-1НТ – в среде микромицета *Paecilomyces variotii*.

Наименьшее значение относительного удлинения в момент разрыва для образцов из герметика УТ-32НТ зафиксировано в среде микромицета *Trichoderma viride*, для образцов герметика ВИТЭФ-1НТ – в среде микромицета *Paecilomyces variotii*.

Среди шести видов микромицетов, используемых для биологического воздействия на образцы из герметиков, выбраны штаммы видов *Paecilomyces variotii* и *Trichoderma viride* как наиболее агрессивные к компонентам комплексной системы защиты по совокупности факторов. При воздействии культур данных грибов в условиях агаризованной питательной среды в течение 14 сут условная прочность герметиков в момент разрыва снижается на 10–30 %, относительное удлинение в момент разрыва изменяется на 15–38 % в зависимости от марки материала.

Таким образом, микромицеты видов *Paecilomyces variotii* и *Trichoderma viride* выбраны для дальнейших испытаний на микологическое воздействие в составе комплексных испытаний ПКЗ.

Заключения

Определены основные контуры новой методики комплексных испытаний ПКЗ, учитывающие не только климатическое воздействие, но также микробиологическое и эксплуатационное (знакопеременные нагрузки). Разработана программа, необходимая для определения перечня и очередности испытаний.

Представлены эскиз КПО и материалы для его изготовления, включая средства ПКЗ. Определены параметры испытаний в КТВ, КСТ, величины усталостных нагрузок и количество циклов, а также параметры микологических испытаний и набор микромицетов, в наибольшей степени влияющих на свойства средств ПКЗ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. № 6. С. 520–530.
2. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
3. Каримова С.А. Коррозия – главный враг авиации // Наука и жизнь. 2007. № 6. С. 63–65.
4. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 12.04.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
5. 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.
6. 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.
7. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 1. Испытания новых материалов // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.

8. Лаптев А.Б., Павлов М.Р., Новиков А.А., Славин А.В. Современные тенденции развития испытаний материалов на стойкость к климатическим факторам (обзор). Часть 2. Основные тенденции // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108.
9. Jenkins M.G., Lara-Curzio E., Gonczy S.T. Mechanical, Thermal and Environmental Testing and Performance of Ceramic Composites and Components. Philadelphia, 2000. 53 p.
10. 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> (дата обращения: 12.04.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91.
11. Grossman D.M. More realistic tests for atmospheric corrosion // ASTM Standartization news. 1996. No. 4. P. 32–39.
12. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 4. С. 18–22.
13. LeBozec N., Blandin N., Thierry D. Accelerated corrosion tests in the automotive industry: A comparison of the performance towards cosmetic corrosion // Materials and Corrosion. 2008. Vol. 59. No. 11. P. 889–894.
14. 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.
15. Белов Д.В., Соколова Т.Н., Карташов В.Р. и др. Коррозия алюминия и алюминиевых сплавов под воздействием микроорганизмов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2007. Т. 50. № 6. С. 60–61.
16. Krivushina A.A., Bobyreva T.V., Smirnov D.N. Fungal resistance of Thiokol sealants to tropical microorganisms and test cultures. Part 1 // Polymer Science, Series D. 2022. Vol. 15. No. 2. P. 177–182. DOI: 10.1134/S1995421222020149.
17. Melchers R.E. Modelling of marine immersion corrosion for mild and lowalloy steels – Part 1: Phenomenological model // Corrosion (NACE). 2003. Vol. 59 (4). P. 319–334.
18. Гликман Л.А. Коррозионно-механическая прочность металлов. М.-Л.: Машгиз, 1955. 175 с.
19. Васильев В.Ю., Шапкин В.С., Баруленкова Н.В. и др. Влияние последействия циклических нагрузок на коррозию алюминиевых сплавов // Защита металлов. 2006. Т. 42. № 3. С. 227–232.
20. Антонова Е.Н., Васильев В.Ю., Шапкин В.С. Электрохимическая диагностика панелей самолета Ту-154 после различных сроков эксплуатации // Научный вестник МГТУ ГА: Аэромеханика и прочность. 2002. Т. 53. С. 110–118.

References

1. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation equipment. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.
2. Antipov V.V., Klochkova Yu.Yu., Romanenko V.A. Modern aluminum and aluminum-lithium alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
3. Karimova S.A. Corrosion is the main enemy of aviation. *Nauka i zhizn*, 2007, no. 6, pp. 63–65.
4. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 12, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
5. 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 plastic. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2011, no. 12, pp. 1–7.
6. Feigenbaum Yu.M., Dubinsky S.V. Influence of random operational damage on the strength and service life of aircraft structures. *Nauchny vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2013, no. 187, pp. 83–91.

7. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climate factors (review). Part 1. Testing of new materials. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-114-122.
8. Laptev A.B., Pavlov M.R., Novikov A.A., Slavin A.V. Current trends in the development of testing materials for resistance to climatic factors (review). Part 2. Main trends. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-99-108.
9. Jenkins M.G., Lara-Curzio E., Gonczy S.T. *Mechanical, Thermal and Environmental Testing and Performance of Ceramic Composites and Components*. Philadelphia, 2000, 53 p.
10. Kutuyev 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> (accessed: April 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-1-78-91.
11. Grossman D.M. More realistic tests for atmospheric corrosion. *ASTM Standardization news*, 1996, no. 4, pp. 32–39.
12. Zhilikov V.P., Karimova S.A., Leshko S.S., Chesnokov D.V. Research of dynamics of corrosion of aluminum alloys when testing in the salt spray chamber (SSC). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. 4, pp. 18–22.
13. LeBozec N., Blandin N., Thierry D. Accelerated corrosion tests in the automotive industry: A comparison of the performance towards cosmetic corrosion. *Materials and Corrosion*, 2008, vol. 59, no. 11, pp. 889–894.
14. Kutuyev A.E., Fomina M.A., Chesnokov D.V. Development of a method for cyclic corrosion tests simulating the full-scale exposure of aluminum alloys to a coastal atmosphere. Part 1. Basic principles. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2019, no. 10, pp. 35–42.
15. Belov D.V., Sokolova T.N., Kartashov V.R. et al. Corrosion of aluminum and aluminum alloys under the influence of microorganisms. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2007, vol. 50, no. 6, pp. 60–61.
16. Krivushina A.A., Bobyreva T.V., Smirnov D.N. Fungal resistance of Thiokol sealants to tropical microorganisms and test cultures. Part 1. *Polymer Science, Series D*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 177–182. DOI: 10.1134/S1995421222020149.
17. Melchers R.E. Modelling of marine immersion corrosion for mild and lowalloy steels – Part 1: Phenomenological model. *Corrosion (NACE)*, 2003, vol. 59 (4), pp. 319–334.
18. Glikman L.A. *Corrosion-mechanical strength of metals*. Moscow-Leningrad: Mashgiz, 1955, 175 p.
19. Vasiliev B.Yu., Shapkin V.S., Barulenkova N.V. et al. Effect of aftereffects of cyclic loads on the corrosion of aluminum alloys. *Zashchita metallov*, 2006, vol. 42, no. 3, pp. 227–232.
20. Antonova E.N., Vasiliev B.Yu., Shapkin V.S. Electrochemical diagnostics of Tu-154 aircraft panels after different periods of operation. *Nauchnyy vestnik MGTU GA: Aeromekhanika i prochnost*, 2002, vol. 53, pp. 110–118.

Информация об авторах

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

Кривушина Анастасия Александровна, старший научный сотрудник, к.б.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

Anastasia A. Krivushina, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Bio.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 27.03.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.04.2025.
The article was submitted 27.03.2025; approved and accepted for publication after reviewing 10.04.2025.