

УДК 620.193.2

М.Г. Абрамова¹, А.Н. Луценко¹, Е.А. Варченко¹

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ
СООТВЕТСТВИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ
МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94

Рассмотрены ключевые вопросы климатической квалификации материалов авиационного назначения и пути их решения для повышения стойкости материалов при воздействии внешней среды для обеспечения надежной эксплуатации изделий авиационной техники в течение заданного срока службы. Сформулированы основные направления развития климатических испытаний металлических материалов, обеспечивающих экономическую эффективность, безопасность эксплуатации, а также исключение аварий по причине коррозионного разрушения.

Ключевые слова: климатическая квалификация, коррозия, натурные испытания, натурно-ускоренные испытания.

M.G. Abramova¹, A.N. Lutsenko¹, E.A. Varchenko¹

**CONCERNING THE ASPECTS OF VALIDATION
OF CLIMATE RESISTANCE
OF AIRBORNE MATERIALS
AT ALL LIFE CYCLE STAGES (review)**

The paper reviews the key issues of climate qualification of airborne materials and ways to solve them in order to increase the durability of materials under the influence of the environment to ensure the reliable operation of aircraft products for a given service life. The main directions of the development of metallic materials' climatic tests have been formed; they are aimed at the prevention of accidents due to corrosion damage as well as at the increase of safe operation and economic efficiency.

Keywords: climatic qualification, corrosion, full-scale tests, full-scale accelerated tests.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Ключевым вопросом применения материалов авиационного назначения в конструкциях, эксплуатирующихся в условиях воздействия климатических факторов, является обеспечение сохраняемости их рабочих характеристик на заданный срок эксплуатации [1, 2]. Основным этапом определения климатического исполнения изделия и назначения его срока службы является проведение комплексных климатических испытаний материалов, являющихся составной частью системы контроля качества изделий [3–5].

Из-за большой длительности централизованных испытаний в различных климатических зонах или отсутствия возможности их проведения в настоящее время климатическое исполнение определяется достаточно условно – на основании результатов ускоренных испытаний в климатических камерах.

При этом всеклиматическое исполнение определяют стойкостью материала в хлорид-содержащих средах – при испытаниях в камере солевого тумана. Тем не менее определенное такими лабораторными методами всеклиматическое исполнение не всегда позволяет гарантировать сохранение стойкости материала в реальных условиях климатических регионов всего земного шара. Так, в работе [6] приведены сведения о коррозионных повреждениях на самолетах типа Як-40, возникших уже в первые годы эксплуатации в климате республики Куба.

Основным методом оценки коррозионного состояния конструкций изделий летательных аппаратов в процессе их эксплуатации является визуальный осмотр, в отдельных случаях сопровождающийся неразрушающим контролем. На основании результатов осмотра специалисты принимают решение о необходимости

ремонта, замены детали либо о продлении ресурса. Анализ работ [7–9] Сибирского научно-исследовательского института авиации им. С.А. Чаплыгина показывает, что коррозионные поражения наиболее часто возникают в обшивке фюзеляжа и силовом наборе планера (стрингер, шпангоут, лонжерон) с образованием расслаивающей, щелевой коррозии и вспучивания покрытия без исключения возможности образования межкристаллитной коррозии. Основной трудностью проведения дефектации изделия является невозможность осмотра скрытых полостей и выявления внутренних дефектов, в том числе подповерхностной коррозии (наиболее опасной – межкристаллитной) неразрушающими методами контроля. Однако вопрос предупреждения развития коррозионных поражений может быть решен еще на стадии проектирования изделия авиационной техники путем детального анализа предполагаемых условий эксплуатации в зависимости от конструктивных особенностей изделия и вероятностной оценки возможности развития коррозионных поражений [10].

Получение данных по коррозионной стойкости на образцах-свидетелях является экономически более эффективным, чем частое обследование коррозионного состояния целого самолета. Так, проведенные за рубежом исследования стойкости тестовых образцов позволили увеличить интервал между внешними мойками со средней коррозионной агрессивностью при эксплуатации техники. Перспективным методом мониторинга коррозионного состояния самолета (что особенно актуально для исследования скрытых и труднодоступных полостей) является также применение датчиков коррозии, действие которых основано на измерении электрических характеристик, температуры и влажности [11].

Отсутствие исчерпывающих сведений по климатической стойкости материалов авиационного назначения приводит к необходимости учета конструктором порой завышенных значений характеристик с «надбавкой на коррозию», приводящей к увеличению массы, а значит, к снижению экономической эффективности изделия.

В данной работе рассмотрены проблемы стандартизации и принципиальные подходы к проведению климатической квалификации металлических материалов авиационной техники, результаты которых направлены на назначение климатического исполнения изделия, обоснованию ресурса в зависимости от климатической зоны эксплуатации, увеличению сроков между ремонтами.

С учетом вышеизложенного сформулировано определение термина «климатическая

квалификация» – это комплексные климатические испытания материала и его соединений, в том числе с защитными покрытиями, направленные на получение исчерпывающих сведений о его поведении в предполагаемых климатических условиях эксплуатации в течение заданного срока службы.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 18.2. «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Внешние воздействующие факторы, параметры районирования для машин и изделий

Среди внешних воздействующих факторов (ВВФ), приведенных в ГОСТ 26883–86 [12], наибольшее влияние на деструкцию материалов оказывают: температура, влажность, солнечная радиация, осадки, пыль, песок, атмосферное давление, ветер, коррозионно-активные загрязнения атмосферы (хлориды, сульфаты и пр.), морской туман, обрастатели и микроорганизмы, а также механическое воздействие – вибрация, ударная волна, дифферент, динамическое давление, механические колебания, звуковой удар, аэродинамический удар и пр.

Основными стандартами, устанавливающими требования к определению районирования на территории СССР машин, приборов и других технических изделий по степени влияния факторов внешней среды, являются ГОСТ 15150–69, ГОСТ 16350–80, ГОСТ 9.039–74, ГОСТ 9.906–83, ГОСТ 25870–83, ГОСТ 24482–80.

Так, ГОСТ 15150–69 [13] устанавливает требования к изделиям в части ВВФ в зависимости от климатического исполнения изделия – общее или всеклиматическое, а также их подкатегории (УХЛ, ХЛ, У, М, Т, ТМ, ТВ, ТС); ГОСТ 16350–80 – климатическое районирование территории СССР и статистические параметры климатических факторов, которые должны использоваться при установлении технических требований, выборе режимов испытаний, правил эксплуатации, хранения, транспортирования всех видов машин, приборов и других технических изделий, предназначенных для эксплуатации в одном из климатических районов [14].

Следует отметить, что все перечисленные ГОСТ разработаны не позже 1980-х гг. для территорий СССР, с распадом которого перестала функционировать и сеть центров климатических станций и площадок.

Для установления коррозионной агрессивности атмосферы групп условий по

ГОСТ 15150–69 используют ГОСТ 9.039–74 [15] по оценке коррозионной агрессивности атмосферы, которым также установлены методы определения параметров окружающей среды.

Общепринятым в мировой практике стандартом по оценке коррозионной агрессивности является ISO 9223–2017, для которого несопоставимость методик определения с ГОСТ 9.039–74 делает невозможным сравнение категорий коррозионной агрессивности, определяемых по данным стандартам. К одним из наиболее критичных разногласий между ISO 9223–2017 и ГОСТ 9.039–74 можно отнести различные принятые пороговые значения для расчета продолжительности увлажнения, подробный анализ которых приведен в работе [16]. Показано, что принятый в ISO 9223–2017 порог измерения продолжительности увлажнения (время в сочетании с относительной влажностью >80% и температурой окружающей среды >0°C) обуславливает недостаточность данной методики и вносит значительные разногласия при сравнении с реальными коррозионными потерями на металлических материалах при испытаниях в экстремальных климатических условиях, таких как побережье Антарктики и влажные тропики. Кроме того, сопоставление результатов оценки продолжительности увлажнения, определенного различными датчиками, является достаточно проблематичным ввиду низкого соответствия показаний датчиков различных конструкций и производителей [16, 17].

В связи с имеющимися противоречиями в методиках оценки параметров внешней среды, установленных отечественными и зарубежными стандартами, в части оценки параметров ВВФ и степени их влияния на материалы можно определить следующие направления развития климатических испытаний:

- актуализация на территории России представительных и экстремальных пунктов по особенностям климатических условий и ВВФ;

- разработка нормативной документации и актуализация действующих ГОСТ на определение степени воздействия внешних факторов в соответствии с зарубежными стандартами;

- создание сети климатических станций для натурной экспозиции материалов и изделий с целью определения сохраняемости свойств материалов в изделиях и назначения климатического исполнения;

- обеспечение мониторинга коррозионной агрессивности атмосферы представительных и экстремальных пунктов климатических регионов эксплуатации воздушного судна на

постоянной основе для учета при прогнозировании параметров коррозионной стойкости материалов в процессе эксплуатации.

Нормативная документация на методы коррозионных испытаний материалов

Требования по защите и стойкости к воздействию внешних факторов изделий авиационной техники отражены в Авиационных правилах АП-25, согласно которым:

- пригодность и долговечность материалов, используемых для изготовления деталей, поломка которых может отрицательно повлиять на безопасность, должны определяться по опыту или путем испытаний; соответствовать утвержденным техническим условиям (ТУ отраслей промышленности, военным ТУ или техническим стандартам), гарантирующим прочность и другие свойства, принятые в расчетных данных; оцениваться с учетом влияния окружающих условий, ожидаемых в эксплуатации, таких как температура и влажность (п. 25.603);

- каждый элемент конструкции должен быть соответствующим образом защищен от снижения или потери прочности в процессе эксплуатации по любой причине, включая атмосферные воздействия, коррозию и истирание, обеспечен достаточными средствами вентиляции и дренажа, если это необходимо для защиты (п. 25.609).

Тем не менее в настоящее время отсутствуют нормативные документы, определяющие «достаточность» защиты и собственно устанавливающие критерии коррозионной стойкости материала – меру, позволяющую позиционировать материал как «стойкий» или «нестойкий» к воздействию соответствующих климатических условий в составе того или иного изделия авиационной техники.

Основные требования к методам проведения коррозионных испытаний и оценке свойств материалов регламентированы комплексом документов, входящих в Единую систему защиты от коррозии и старения [18].

Документом, устанавливающим требования к проведению натурных климатических испытаний металлических материалов, является ГОСТ 9.909–86 [19]. Стандарт устанавливает требования к проведению испытаний на атмосферную коррозию, на коррозию под напряжением, на контактную и щелевую коррозию в атмосфере, а также на проведение испытаний в морской воде (в том числе на контактную и щелевую коррозию). Стандартом установлена продолжительность испытаний: образцов металлов и сплавов – не менее трех лет, образцов с покрытиями – не менее двух лет.

Общие требования к проведению климатических испытаний, в том числе требования к образцам, устанавливает ГОСТ 9.905–2007 [20]. Продолжительность испытаний по этому ГОСТ выбирают так, чтобы можно было однозначно оценить поведение образцов. Если для этого необходимо выявить ход коррозии в процессе испытания, то периодичность съёмов образцов устанавливают в программе испытаний по геометрической прогрессии – например: 1, 3, 6, 12 ч; 1, 2, 4, 8 сут; 3, 6, 12 мес; 2, 4 года и т. д.

Требования к натурным климатическим испытаниям лакокрасочных покрытий регламентированы ГОСТ 6992–68 [21]. В разделе «Проведение испытаний» установлен порядок осмотра образцов, а также даны ссылки на стандарты для оценки свойств покрытий после натуральных испытаний, указаны виды разрушений покрытий. Необходимые сроки натуральных испытаний стандартом не оговорены.

Тем не менее анализ результатов длительных климатических испытаний в Батумском филиале ВИАМ показывает, что снижение механических свойств материалов в результате воздействия факторов внешней среды происходит не менее чем через 10 лет экспозиции (рис. 1) [2].

Так, ГОСТ 30630.0.0–99 [22] устанавливает общие требования к испытаниям технических изделий на воздействие внешних факторов путем выдержки в имитационных условиях, воспроизводящих 1–2 контролирующих параметра. Согласно данному стандарту, «...изделия считают выдержавшими испытание, если в процессе и после испытания они удовлетворяют требованиям, установленным в стандартах и ТУ на изделия и ПИ для испытаний данного вида». Основным недостатком

данного стандарта является то, что изделия в процессе эксплуатации не подвергаются воздействиям, регламентированным в данном ГОСТ, – в реальных условиях на изделие оказывает воздействие совокупность климатических и механических факторов, специальных сред и пр.

Для получения исчерпывающих сведений о поведении материалов авиационного назначения в условиях агрессивного воздействия внешних факторов, во ФГУП «ВИАМ» разработана процедура по проведению натуральных климатических испытаний металлических, неметаллических материалов и защитных покрытий, устанавливающая необходимые сроки натурной экспозиции для 26 классов конструкционных и функциональных материалов, а также перечень требуемых для оценки характеристик. Так, рекомендуемые сроки экспозиции для алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, металлополимерных композиционных материалов, коррозионноустойчивых сталей, сплавов на никелевой и кобальтовой основе при испытаниях на общую коррозию составляют: 6 мес, 1, 2, 3, 5, 10 и 15 лет.

Однако при переходе от материала к конструкции сталкиваются с такими опасными в коррозионном отношении аспектами, как коррозия контактных пар разнородных материалов [23] и крепежа (для алюминиевых сплавов наиболее частый вид – расслаивающая коррозия), в том числе под воздействием нагрузки [24, 25], а также щелевая [26] и контактная коррозия. Для конструктивных элементов с защитными покрытиями частым видом разрушения является распространение коррозии под покрытием при нарушении его (покрытия) целостности.

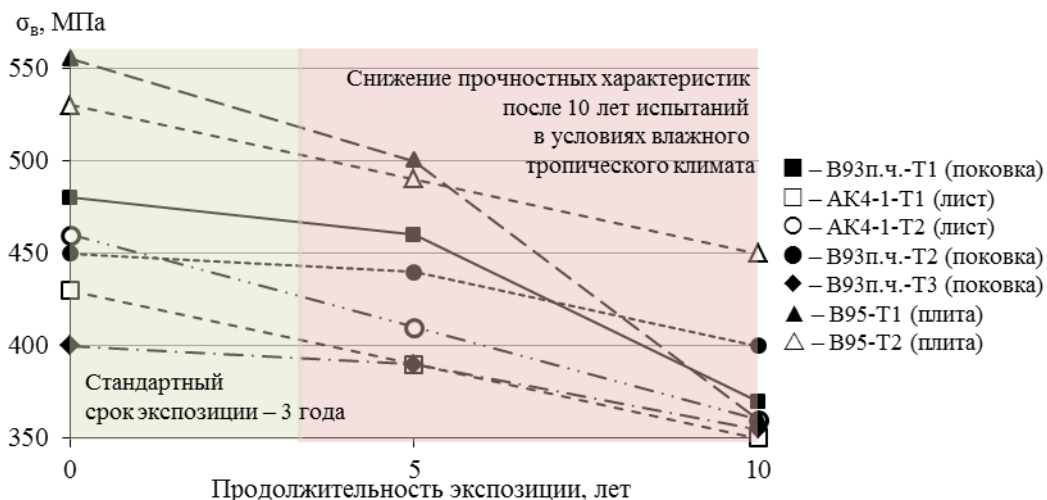


Рис. 1. Изменение прочностных характеристик алюминиевых сплавов после 10 лет натуральных испытаний в Батумском филиале ВИАМ

Увеличению скорости коррозионного разрушения также способствует воздействие обрастателей, что характерно для материалов, применяемых в конструкциях гидросамолетов, авиационной техники морского базирования, самолетов-амфибий и в других областях машиностроения, эксплуатация которых связана с воздействием морской воды [27], а также бактерий и микроорганизмов, развивающихся в условиях соответствующей благоприятной среды [28, 29].

Проблема прогнозирования и назначения срока службы материалов в составе конструкций воздушных судов является предметом исследования в отечественных и зарубежных самолетостроительных организациях и для авиационных властей. Существующие подходы позволяют на начальном этапе оценить коррозионные потери на длительный период равномерно корродирующих металлических материалов [30, 31] и склонных к локальной коррозии алюминиевых сплавов [32–35], сроки службы покрытий многослойных систем [36] и др. При этом наиболее достоверные результаты показывают методы исследований, основанные на моделировании реальных климатических условий, при которых сохраняется механизм коррозионного разрушения [37], а также натурно-ускоренные испытания [38, 39]. Работы [24, 40] посвящены вопросам исследования поведения материалов в составе полномасштабных конструкций в условиях одновременного воздействия климатических и механических факторов.

Приведенный ранее анализ нормативно-технической документации позволяет сделать вывод о том, что между имеющимся базисом нормативных документов, устанавливающих требования к проведению испытаний элементарных образцов и оценке изменения их свойств по результатам климатического воздействия, а также комплексом нормативных документов, устанавливающих требования к районированию территории СССР и исполнению для различных климатических районов, отсутствует связующее звено в виде требований к климатической квалификации материалов – к испытаниям материалов и их соединений, позволяющим обосновать климатическое исполнение изделий на соответствие требованиям ГОСТ 15150–69 в течение заданного конструктором срока эксплуатации изделия.

Подтверждение соответствия климатической стойкости материалов к воздействию внешних факторов на всех этапах жизненного цикла

В настоящее время конструктор при проектировании изделия авиационной техники

руководствуется преимущественно результатами ускоренных коррозионных испытаний, а результаты длительных натуральных испытаний, наиболее достоверно описывающие поведение материала в условиях воздействия внешних факторов, не используются эксплуатантами изделий авиационной техники. Тем не менее эти данные представляют большой интерес, так как являются прямыми данными по изменению физико-механических, металлографических, фрактографических и других характеристик, которые невозможно получить на материалах конструкции в процессе жизненного цикла изделия авиационной техники.

Испытания на подтверждение соответствия климатической стойкости материала к воздействию внешних факторов должны проводиться в обязательном порядке для всех конструктивных материалов с использованием:

- типовых образцов (в случае применения материала с защитным покрытием в составе конструкции – проведение испытаний типовых образцов, в том числе с нанесенным покрытием) с оценкой изменения служебных характеристик;

- образцов в составе конструктивно-подобного образца, в том числе с приложением механических нагрузок;

- элементов конструкции с оценкой стойкости контактных пар разнородных материалов, целевой коррозии, крепежных элементов, в том числе при воздействии нагрузок эксплуатационного уровня.

По причине большой длительности натуральных климатических испытаний для своевременной квалификационной оценки материала по стойкости к воздействию внешних факторов с целью обоснования расчетных значений характеристик прочности материала в течение всего срока эксплуатации конструкции и своевременной постановки материала в изделие целесообразно программу комплексных климатических испытаний разделить на этапы (рис. 2).

Этап 1. Проведение лабораторных и натурно-ускоренных/циклических климатических испытаний, направленных на получение в течение 1–2 лет сведений о стойкости материалов, их соединений и защитных покрытий при принудительной интенсификации процессов коррозии и старения. Начало проведения натуральных испытаний, получение результатов – после 1–2 лет экспозиции. Полученные результаты необходимы для принятия решения по постановке материала в изделие и применяются в расчетах при проектировании, также на их основе разрабатывают прогнозные модели деградации служебных характеристик материала на длительные периоды эксплуатации.

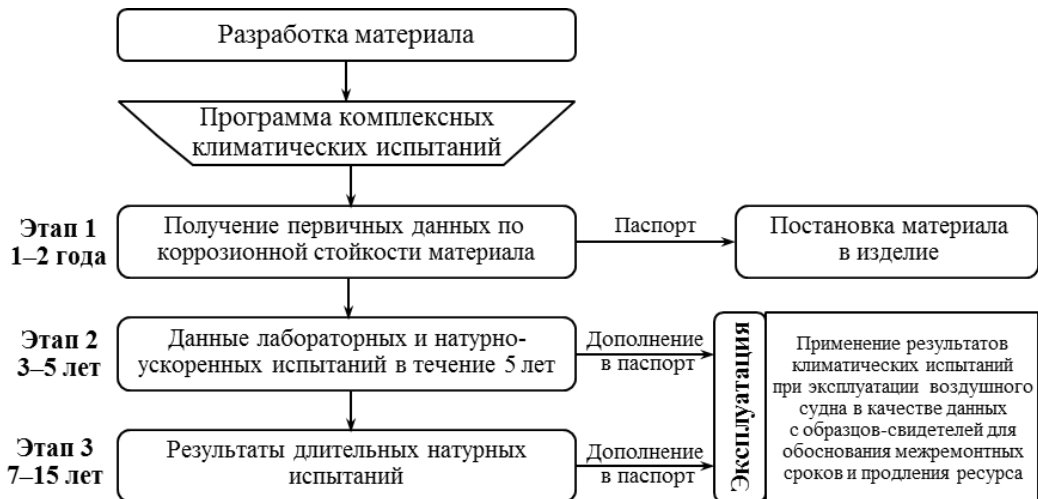


Рис. 2. Использование результатов исследования климатической стойкости материала от постановки в изделие до ремонта и замены детали

Этапы 2 (3–5 лет) и 3 (7–15 лет). Проведение натуральных климатических испытаний материалов, их соединений и защитных покрытий в различных климатических зонах с учетом предполагаемых условий эксплуатации и срока службы в составе изделия, направленных на получение сведений по климатической стойкости материалов за длительный период. На основании полученных сведений проводится корректировка прогнозных моделей деградации свойств. Эти результаты также используют для обоснования межремонтных сроков, принятия решений о ремонте или замене детали, а также при обосновании продления ресурса изделия.

Следует отметить, что для разработки материалов авиационного назначения с улучшенными свойствами и средств их защиты одним из ключевых моментов является обмен информацией между эксплуатантом, конструктором изделий авиационной техники и разработчиком материала. Данный обмен наиболее эффективно может быть реализован путем создания единой информационно-аналитической системы [4, 41, 42]. Накопление сведений о поведении материалов в составе реальных изделий в условиях эксплуатации и обмен данными позволят:

- разработать регламенты эксплуатации материалов в зависимости от условий их работы в составе изделия (климатическое воздействие различной степени агрессивности при соответствующей наработке часов полета, длительности хранения);
- разработать модели прогнозирования поведения материалов в зависимости от условий их эксплуатации;
- создать базы данных по климатической стойкости материалов;

– определить квоты безопасной повреждаемости материалов;

– разработать модели численного пересчета данных об изменении характеристик материала, полученных на элементарных образцах, в данные об изменении характеристик материала полномасштабных полуфабрикатов, деталей и агрегатов, используемых в изделии и др.

Заключения

На основании вышеизложенного сформулированы основные направления развития климатических испытаний для обеспечения надежной эксплуатации изделий авиационной техники.

1. Важным этапом разработки, паспортизации и постановки материала в изделие является проведение комплексных климатических испытаний, учет при расчете конструкции реальных данных по стойкости материала в условиях воздействия внешних факторов при верификации прогнозных значений, полученных на начальных этапах комплексных климатических испытаний.

2. Эксплуатацию изделий авиационной техники должны проводить при мониторинге коррозионного состояния используемых материалов с учетом прогнозируемого изменения их коррозионных потерь, при расчете которых учитывают актуальные данные по коррозионной агрессивности атмосферы климатических районов эксплуатации воздушных судов.

3. Необходима разработка нормативной документации и актуализация:

- действующих ГОСТ на определение степени воздействия внешних факторов в соответствии с зарубежными стандартами и опытом климатических испытаний;

– стандартов на порядок проведения климатической квалификации материалов;

– комплекса стандартов на порядок проведения ускоренных и натуральных испытаний с целью подтверждения соответствия климатической стойкости материалов для изделий авиационного и специального назначения на всех этапах жизненного цикла.

4. Прогнозные модели сохраняемости свойств материалов разрабатывают с учетом ожидаемых условий эксплуатации и

специфики их применения в составе реальной конструкции.

5. Результаты анализа поведения материалов в условиях эксплуатации в составе конструкции, а также результаты комплексной оценки их климатической стойкости в виде образцов-свидетелей необходимо интегрировать в единую информационно-аналитическую систему, доступную как разработчику материала и конструктору воздушного судна, так и эксплуатанту изделия авиационной техники.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор // Вопросы материаловедения. 2016. №3 (87). С. 126–137.
3. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Скрипачев С.Ю. Стандартизация климатической квалификации изделий // Стандарты и качество. 2016. №11. С. 82–85.
4. Гаврилов И.В., Бакшаев С.И. Климатические испытания изделий на стадии жизненного цикла эксплуатации // Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате: материалы II Международ. науч.-техн. конф. (Геленджик, 23 сент. 2016 г.). М.: ВИАМ, 2016. Ст. 5.
5. Прокопенко А.Н., Бакшаев С.И. От оценки климатической стойкости материалов к климатическому исполнению изделий авиационной техники военного назначения // Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате: материалы III Международ. науч.-техн. конф. (Геленджик, 7 сент. 2018 г.). М.: ВИАМ, 2018. С. 135–151.
6. Антонова М.В., Божевалов Д.Г., Котелевец Н.А., Обухов П.В., Соколов Ю.С. Анализ влияния экстремальных климатических условий на лакокрасочные покрытия и коррозионное поведение металлов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2009. №141. С. 105–112.
7. Волчек В.А., Лапаев А.В. Анализ развития коррозионных поражений в эксплуатации самолетов Ил-86 // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2006. №103. С. 187–189.
8. Лапаев А.В., Шапкин В.С., Волчек В.А. Исследование коррозионных поражений элементов авиационных конструкций самолетов Ту-154, Ил-86 // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2006. №100. С. 25–28.
9. Лапаев А.В., Семин А.В., Шапкин В.С. Применение информационно-аналитической базы данных для анализа технического состояния конструкции планера транспортных самолетов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. №175. С. 7–12.
10. Лапаев А.В., Митрофанов О.В. Применение MSG-3 для зонного анализа конструкции пассажирского самолета по условию коррозионного поражения на стадии проектирования // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2009. №141. С. 93–98.
11. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Шелемба И.С. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 26–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34.
12. ГОСТ 26883–86. Внешние воздействующие факторы. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2008. 11 с.
13. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М.: Стандартинформ, 2006. 60 с.
14. ГОСТ 16350–80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Изд-во стандартов, 1981. 150 с.
15. ГОСТ 9.039–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы. М.: Изд-во стандартов, 1991. 50 с.
16. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.

17. Schindelholz E., Kelly R.G., Cole I.S. et al. Comparability and accuracy of time of wetness sensing methods relevant for atmospheric corrosion // *Corrosion Science*. 2013. Vol. 67. P. 233–241.
18. ГОСТ 9.101–2002. Единая система защиты от коррозии и старения. Основные положения. М.: Изд-во стандартов, 2003. 7 с.
19. ГОСТ 9.909–86. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы испытаний на климатических испытательных станциях. М.: Изд-во стандартов, 1986. 22 с.
20. ГОСТ 9.905–2007. Единая система защиты от коррозии и старения. Методы коррозионных испытаний. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007. 18 с.
21. ГОСТ 6992–68. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод испытаний на стойкость в атмосферных условиях. М.: Изд-во стандартов, 2003. 10 с.
22. ГОСТ 30630.0.0–99. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 2000. 28 с.
23. Каримова С.А., Павловская Т.Г., Чесноков Д.В., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // *Российский химический журнал*. 2010. Т. 54. №1. С. 110–116.
24. Гладких А.В. Опыт проведения климатических испытаний элементов конструкций при приложении механических напряжений эксплуатационного уровня на силовом полу ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова // *Современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф. «Климат-2019»*. (Геленджик, 16–17 мая 2019 г.). М.: ВИАМ, 2019. 1 электрон. опт. диск. С. 28–44.
25. Синявский В.С., Калинин В.Д. Коррозионная стойкость напряженных строительных конструкций из алюминиевых сплавов // *Защита металлов*. 2007. Т. 43. №6. С. 631–642.
26. Варченко Е.А., Курс М.Г. Щелевая коррозия алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей в морской воде // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2018. №7 (67). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105.
27. Михеев А.И. Влияние обрастания и низких температур на безопасную эксплуатацию судов // *Водный транспорт*. 2013. №3 (18). С. 56–61.
28. Лаптев А.Б., Голубев А.В., Киреев Д.М., Николаев Е.В. К вопросу биодеструкции полимерных материалов в природных средах (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2019. №9 (81). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-100-107.
29. Бухарев Г.М., Лаптев А.Б., Яковенко Т.В., Бобырева Т.В. Роль оценки биологического фактора в обеспечении безопасной эксплуатации сложных технических систем в течение жизненного цикла // *Проблемы оценки климатической стойкости материалов и сложных технических систем: сб. материалов II Всерос. науч.-техн. конф. «Климат-2017»*. (Геленджик, 3–4 авг. 2017 г.). М.: ВИАМ, 2017. 1 электрон. опт. диск. С. 21–30.
30. ГОСТ 9.040–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях. М.: Изд-во стандартов, 1975. 15 с.
31. Михайлов А.А., Панченко Ю.М., Игонин Т.Н., Сулоева М.Н., Ковтанюк В.В., Маркина Л.В. Атмосферная коррозия углеродистой стали: моделирование и картографирование территории Российской Федерации // *Коррозия: материалы, защита*. 2010. №11. С. 1–10.
32. Курс М.Г., Антипов В.В., Луценко А.Н., Кутырев А.Е. Интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 24–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-24-32.
33. Курс М.Г. Прогнозирование прочностных свойств обшивки ЛА из деформируемого алюминиевого сплава В950.ч.-Т2 с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2018. №5 (65). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-101-109.
34. Чесноков Д.В., Антипов В.В., Кулюшина Н.В. Метод ускоренных лабораторных испытаний алюминиевых сплавов с целью прогнозирования их коррозионной стойкости в условиях морской атмосферы // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн*. 2016. №5 (41). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-10-10.
35. Зубарев А.П., Лапаев А.В., Лапаев В.П. Использование обобщенного параметра коррозионного поражения для оценки долговечности элементов конструкций с коррозионными поражениями // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2007. №119. С. 30–32.
36. Виноградова С.С., Кайдриков Р.А., Журавлев Б.Л. Теоретические основы прогнозирования коррозионной стойкости многослойных систем покрытий // *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. №11. С. 167–172.

37. 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.
38. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 66–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73.
39. Антипов В.В., Курс М.Г., Гириш Р.И., Серебренникова Н.Ю. Натурные климатические испытания металлополимерных композиционных материалов типа СИАЛ в морском климате // Авиационные материалы и технологии. 2019. №4 (57). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-56-64.
40. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
41. Лапаев А.В. Анализ современных подходов к оценке прочностных характеристик элементов конструкций воздушных судов с эксплуатационными коррозионными поражениями // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2006. №103. С. 190–193.
42. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. №3. С. 28–32.