

Научная статья

УДК 629.7.018.4

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-16-31

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М.А. Фомина¹, А.Е. Кутырев¹, Е.И. Ямщиков¹, А.И. Вдовин¹

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

Аннотация. Рассмотрено влияние степени коррозионных повреждений на прочностные характеристики. Представлены методы оценки коррозионных повреждений, включая питтинговую коррозию, а также математические модели для оценки долговечности алюминиевых сплавов. Показано, что применяемые методы имеют значительные погрешности. Предложено использовать подход, основанный на создании коррозионных повреждений, идентичных возникающим при натурных испытаниях.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, коррозия, коррозионные повреждения, методы оценки коррозионных повреждений, коррозионные испытания, усталостная долговечность, математические модели

Для цитирования: Фомина М.А., Кутырев А.Е., Ямщиков Е.И., Вдовин А.И. Опыт исследований влияния коррозионных повреждений на прочностные характеристики алюминиевых сплавов, применяемых в авиационной промышленности // Труды ВИАМ. 2023. № 9 (127). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-16-31.

Scientific article

EXPERIENCE IN IMPACT RESEARCH OF CORROSION DAMAGE ON STRENGTH CHARACTERISTICS ALUMINUM ALLOYS USED IN THE AVIATION INDUSTRY

M.A. Fomina¹, A.E. Kutyrev¹, E.I. Yamschikov¹, 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 influence of the degree of corrosion damage on the strength characteristics of aluminum alloy are considered. Methods for assessing corrosion damage, including pitting corrosion, and mathematical models for assessing the durability of aluminum alloys are considered. The methods used for this assessment have high errors. It is proposed to use the approach based on the creation of corrosion damages identical to those that occur after full-scale tests.

Keywords: aluminum alloys, corrosion, corrosion damage, methods for assessing corrosion damage, corrosion testing, fatigue life, mathematical models

For citation: Fomina M.A., Kutyrev A.E., Yamschikov E.I., Vdovin A.I. Experience in impact research of corrosion damage on strength characteristics aluminum alloys used in the aviation industry. *Trudy VIAM*, 2023, no. 9 (127), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-9-16-31.

Введение

Актуальность исследований влияния коррозионных повреждений на прочностные характеристики алюминиевых сплавов в авиации обоснована как в отечественной [1–44], так и зарубежной [45–68] научно-технической литературе. Это обусловлено тем, что на практике невозможно исключить коррозию на эксплуатируемых изделиях авиационной техники.

Согласно требованиям АП 25.571 «оценка прочности должна показывать, что аварийной или катастрофической ситуации из-за... коррозии... можно избежать в течение всего времени эксплуатации самолета». Однако научная база для оценки прочностных свойств в настоящее время отсутствует, что отмечают специалисты, отвечающие за целостность конструкции воздушных судов (ВС) [1, 2]. Согласно работе [3], для обеспечения методической документации, необходимой для эксплуатации ВС с коррозионными повреждениями, важно решить две научные задачи:

- разработка моделей прогнозирования роста коррозионных повреждений на алюминиевых сплавах в зависимости от коррозионной агрессивности атмосферы, в которой эксплуатируется ВС;
- разработка моделей влияния коррозионных повреждений на прочностные свойства алюминиевых сплавов.

При этом заметим, что вторая задача, которой посвящена данная статья, является наиболее важной в рамках эксплуатации ВС. Такой подход к обеспечению безопасности авиационной техники связан со сложностью прогнозирования скорости и глубины коррозионных повреждений пассивирующихся сплавов, применяемых в авиации (алюминиевых, титановых, никелевых сплавов и высоколегированных сталей) [4–6]. Для данных сплавов характерны локальные виды коррозии, изображенные на рис. 1.

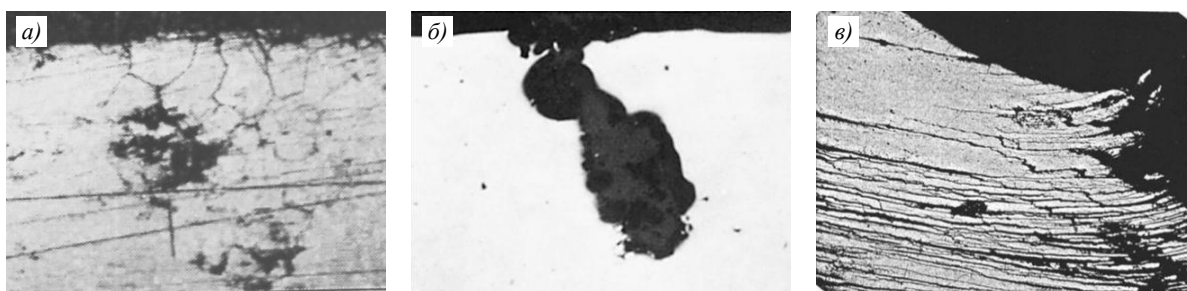


Рис. 1. Типовые коррозионные повреждения: *a* – межкристаллитная коррозия; *б* – питтинговая коррозия; *в* – расслаивающая коррозия

При локальной коррозии из-за большого разнообразия структур и фаз в сплавах, наличии примесей и включений в настоящее время невозможно количественно оценить, а тем более спрогнозировать геометрические параметры повреждений.

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

Зависимость количества летных происшествий от интенсивности коррозии

Практический опыт показывает, что полное исключение коррозии даже при наличии качественных металлических и лакокрасочных покрытий в конструкциях невозможно. Уже после 5 лет эксплуатации на деталях ВС образуются коррозионные повреждения, особенно в местах механического воздействия на покрытия, деформаций детали и/или некачественного нанесения покрытий [7–10]. Согласно работе [3], доля различных дефектов конструкций ВС составляет, %:

Усталостные трещины	3–5
Коррозионные повреждения	70–80
Случайные механические повреждения	10–15
Прочие	10–15

Аналогичная картина выявлена не только в отечественной, но и в зарубежной авиации. Так, в ВВС Австралии в качестве основных проблем при эксплуатации авиационной техники называют увеличение количества коррозионных повреждений и времени внепланового технического обслуживания [47, 48].

С увеличением срока эксплуатации самолета растет и количество коррозионных дефектов. Так, согласно отчету компании Boeing [11–13], средний срок эксплуатации гражданских самолетов составляет, лет:

1971	1986	1990	2000
5	10	12	15

По мнению авторов работ [14, 15], коррозия относится к медленным процессам. Соответственно, коррозионный дефект не представляет такой опасности, как, например, усталостный. Это согласуется с исследованиями, проведенными авторами работ [16, 17, 49, 50], но заметим, что коррозионный дефект в конструкции ВС под возможным воздействием знакопеременных нагрузок будет концентратором напряжения, что может привести к быстрорастущему дефекту – усталостной трещине.

Поскольку изменения прочностных характеристик в результате коррозионных повреждений не оценивают, процент летных происшествий, связанных с коррозией, составляет значительную долю: 40 % [18]. При этом доля авиационных происшествий вследствие коррозии и усталости конструкций в 1971–1979 гг. составляла 21,4 %, в 1979–1983 гг.: 38,7 %, т. е. имеет тенденцию к росту.

Требования к увеличению срока эксплуатации ВС до 30 лет обуславливают новый подход к изучению коррозионных повреждений. Противокоррозионные мероприятия в процессе эксплуатации вносят существенный вклад в общие эксплуатационные затраты. Поэтому введен принцип допустимой повреждаемости, позволяющий использовать самолеты с повреждениями, в том числе коррозионными [19–24, 51]. Этот принцип актуализирует разработку методов оценки сохраняемости механических характеристик в зависимости от степени коррозионного повреждения деталей ВС.

Зависимость долговечности деталей и конструкций воздушных судов из алюминиевых сплавов от коррозионных повреждений

Исследования, проведенные в работе [52], показали, что глубина расслаивающей коррозии (рис. 2) не эквивалентна механическому утонению. Уменьшение долговечности в результате расслаивающей коррозии значительно больше вследствие:

- большего наводороживания поверхности алюминиевого сплава при межкристаллитной коррозии. Это приводит к образованию микротрещин и дефектов на поверхности, что ухудшает прочность и стойкость материала;
- снижения пластичности алюминиевого сплава. Расслаивающая коррозия вызывает изменения в микроструктуре материала, что приводит к уменьшению его пластичности и способности к деформации без разрушения.

Эти выводы также подтверждены в работах ученых из Китая, России и США [25, 26, 53, 54].



Рис. 2. Расслаивающая коррозия алюминиевого сплава в конструкции воздушного судна

В работе [26] показано, что усталостная долговечность при межкристаллитной коррозии в 8 раз меньше, чем при питтинговой коррозии. Вариативность коррозионных повреждений у разных сплавов и различная кинетика протекания процесса не позволяют построить зависимости для нескольких сплавов.

Методы коррозионного мониторинга на воздушных судах

На практике применяют подход, согласно которому необходимость ремонта или замены детали определяется в зависимости от уменьшения ее толщины. Если толщина уменьшилась менее чем на 10 %, то деталь ремонтируют, более 10 % – заменяют [27]. Пример зачистки поврежденного слоя металла поверхности фюзеляжа представлен на рис. 3.



Рис. 3. Подвергнутая зачистке поверхность обшивки воздушного судна, на которой наблюдаются питтинги

В настоящее время широко распространены датчики коррозии, которые можно установить на всех деталях ВС. Такие датчики измеряют влажность и температуру с помощью оптоволоконных линий, связанных с процессором, и в режиме онлайн могут определять наличие и скорость развития коррозионного повреждения деталей. Датчики влажности и температуры предоставляют только опосредованную информацию о возможности возникновения коррозии и скорости протекания процесса [28–31].

Созданы алгоритмы «доза–ответ», при которых скорость коррозии для алюминиевых сплавов однозначно рассчитывают по величинам времени увлажнения поверхности, температуры воздуха и образца, содержанию в атмосфере хлорид-ионов и диоксида серы [30–32].

Опыт исследований и определения зависимости между степенью коррозионных повреждений и прочностными характеристиками алюминиевых сплавов в основном базируется на проверенном подходе – натуральных и ускоренных испытаниях образцов алюминиевых сплавов в условиях коррозионной атмосферы, последующих испытаниях механических характеристик, составлении эмпирических зависимостей «условия экспозиции – интенсивность коррозии – механические свойства» [33].

Расчетные прочностные характеристики, используемые для оценки воздействия коррозии

Для исследования влияния коррозионных повреждений на прочность необходимо определить прочностные характеристики. Расчетные характеристики прочности материалов при воздействии коррозионной среды изменяются в зависимости от типа нагрузки (статическая короткодействующая, статическая долговременная, динамическая) и наличия трещин в твердом материале [20].

Многообразие расчетных характеристик делает задачу адекватной оценки воздействия коррозии практически невыполнимой. Специалисты Сибирского научно-исследовательского института авиации им. С.А. Чаплыгина (СибНИА) изучили методы оценки допустимости коррозионных повреждений и выявили, что для оценки остаточной работоспособности при воздействии коррозии основными характеристиками являются прочность и усталостная долговечность [33].

Влияние коррозионных повреждений на усталостные характеристики

Изменения статических характеристик при коррозионных повреждениях обычно незначительны, за исключением случаев, когда появляется расслаивающая или межкристаллитная коррозия. В связи с этим для оценки остаточной работоспособности материалов следует уделить внимание более чувствительному показателю – усталостной долговечности, которая подвержена существенным изменениям. Это подтверждает экспоненциальная зависимость усталостной долговечности от глубины питтинга (рис. 4), полученная авторами работы [55].

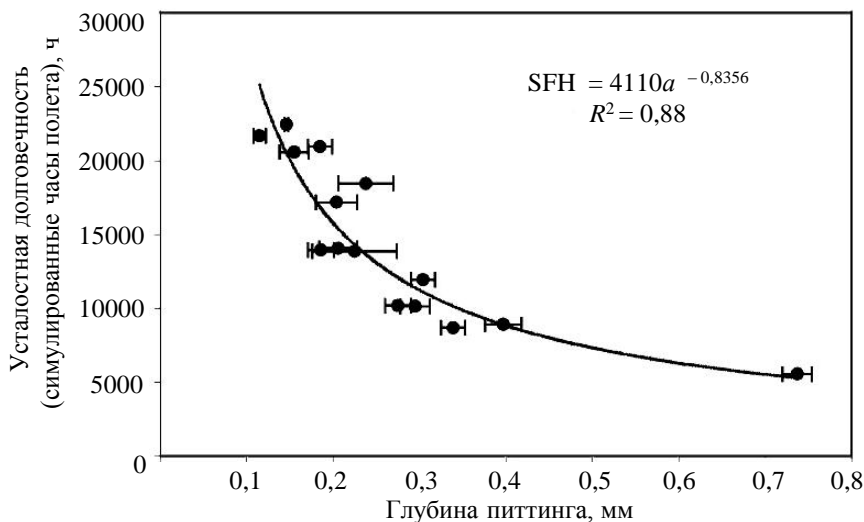


Рис. 4. Влияние глубины питтинга на усталостную долговечность по данным работы [55]

На рис. 5 представлена аналогичная зависимость согласно данным работы [69]. На графике проведена аппроксимационная прямая, которая позволяет продемонстрировать резкое снижение усталостной долговечности при появлении коррозионного повреждения, что требует особого внимания [56–58].

Исходя из вышеописанных работ, в которых выявлена основная характеристика для описания влияния коррозионных повреждений – усталостная долговечность (количество циклов до разрушения), проанализируем методы оценки показателя, описанные в научно-технической литературе.

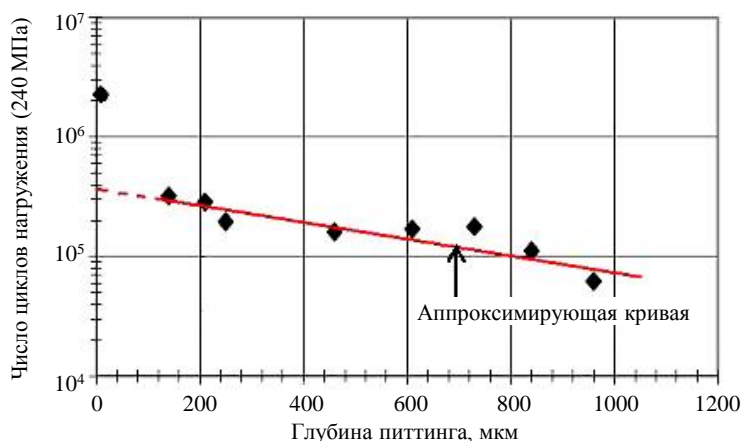


Рис. 5. Влияние глубины питтинга на усталостную долговечность по данным работы [69]

Оценка коррозионных повреждений статистическим методом

Статистический метод оценки коррозионных повреждений на изделиях авиационной техники заключается в статистическом анализе данных, полученных в результате измерения толщины металла на разных участках поверхности изделия. Метод разработан специалистами Московского государственного технического университета гражданской авиации (МГТУГА). На основе результатов их работы создан «Паспорт коррозионного состояния воздушного судна», в котором отражают количество и качество коррозионных дефектов [34, 35].

Для реализации этого метода сначала измеряют толщину металла в местах коррозионных повреждений, расположенных по всей поверхности изделия. Затем вычисляют статистические показатели, такие как среднее значение, стандартное отклонение и коэффициент вариации, отражающие характер изменения толщины металла на поверхности изделия. Далее, исходя из полученных статистических данных, анализируют степень развития коррозионных повреждений. Для этого используют различные математические модели, такие как распределение Гаусса и распределение Пуассона [36, 37].

Несмотря на наличие объективных преимуществ, таких как оценка степени коррозионных повреждений детали без разборки или демонтажа изделия, статистический метод имеет явные недостатки:

- невозможность применения для новых разработанных изделий авиационной техники;
- результатом может стать постановка самолета на особый контроль по коррозионному состоянию, что значительно увеличит затраты;
- отсутствие возможности разделения ВС в зависимости от места их базирования.

В научных работах, опубликованных зарубежными авторами, также активно применяют статистический метод. В одной из таких работ сравнили полученные результаты с прогнозом, вычисленным на основе справочных данных статистического метода. Обнаружены значительные расхождения между экспериментальными и прогнозными значениями [58].

Моделирование коррозионного повреждения

Моделирование коррозионного повреждения (Equivalent Crack Size – ECS) используют для оценки влияния коррозии на долговечность и надежность материалов и конструкций в разных условиях эксплуатации [13, 60–64]. Кроме того, его используют для определения эффективности защитных покрытий и методов защиты от коррозии, а также для прогнозирования оставшегося ресурса конструкции и принятия решений по ее замене или ремонту. Метод ECS реализуют с помощью компьютерных программ,

которые моделируют процессы коррозии и прогнозируют возможные повреждения [60, 61]. При моделировании коррозионного повреждения используют геометрическое представление в виде полусферы; пример такого усреднения представлен на рис. 6 [62].

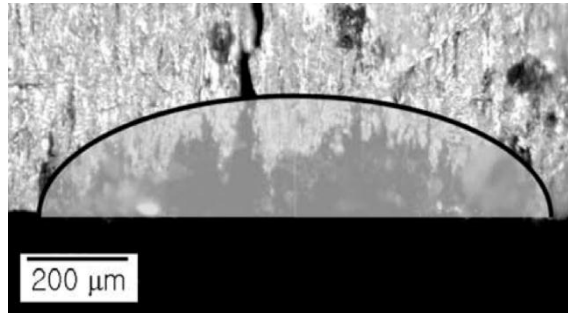


Рис. 6. Снимок, выполненный на дифференциальном интерференционно-контрастном микроскопе, с большим увеличением мест зарождения трещин (темная линия представляет собой среднюю эллиптическую кривую, проведенную через точки наибольшей глубины коррозии) [62]

Как и любое другое моделирование, метод ECS позволяет сократить время на проведение испытаний материала на коррозионную стойкость, а также уменьшить затраты на эксплуатацию изделий, связанные с реализацией регулярных контрольных мероприятий [65, 66]. Применение метода ECS ограничено исключительностью учета характеристик повреждений, таких как глубина или диаметр язвенной коррозии, в зависимости от выбранной модели. Кроме того, при рассмотрении коррозионного повреждения как концентратора напряжений не учитывают кинетику коррозионного процесса. Расчетные значения, получаемые по данной модели, демонстрируют высокую чувствительность к изменениям размеров повреждений, условий среды и материала, что проявляется в значительных погрешностях и полном отказе функционирования модели [47, 67].

В работе [47] обнаружены значительные расхождения между модельными и экспериментальными данными. Показано, что при нанесении механических дефектов на поверхность образцов погрешность модели составляет <1 %. Однако при моделировании реальных коррозионных повреждений, которые имеют более сложную поверхность, погрешность значительно возрастает и модель становится неадекватной. Зависимость между смоделированной и реальной глубиной питтинга для сплава марки 7075 представлена на рис. 7 [47].

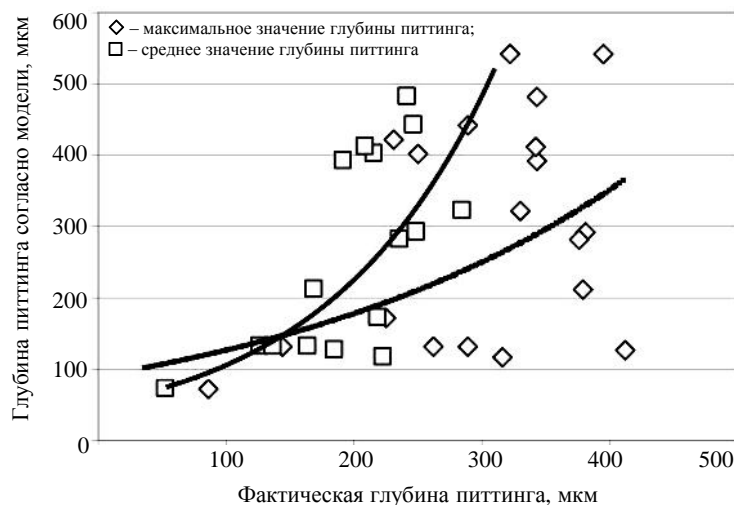


Рис. 7. Зависимость смоделированной и реальной глубины питтинга для сплава марки 7075 [47]

Другими словами, как утверждают специалисты СибНИА, моделирование конкретного типа повреждения показывает точность только для этого типа, но не распространяется на другие [38, 39]. В связи с этим необходимо разработать новый подход для моделирования коррозионных повреждений, учитывающий более широкий спектр характеристик повреждений, кинетику процессов коррозии и нацеленный на применение в реальных условиях.

Ускоренный метод оценки коррозионных повреждений

Процесс натуральных испытаний достаточно длительный и не отвечает современным требованиям рыночной экономики, так как быстрое внедрение новых материалов обеспечивает конкурентное преимущество производителю. В работе [40] предложено наносить ускоренным методом коррозионные повреждения, идентичные повреждениям при натуральных испытаниях. Для этого необходимо выработать некий критерий, который позволял бы соотносить коррозионные повреждения, полученные натурным и ускоренным методами.

Авторы работы [41] провели опыты с использованием сплава марки 1163-АТВ с низкой склонностью к межкристаллитной коррозии при разных соотношениях силы тока анодного растворения и длительности его протекания. Предложено в качестве критерия коррозионной повреждаемости использовать удельную величину количества электричества при анодном растворении алюминиевого сплава, которая по закону Фарадея соответствует потерям массы образца при натуральных испытаниях.

Для проверки применимости данного подхода к алюминиевым сплавам с более высокой склонностью к межкристаллитной коррозии в работе [42] подобный эксперимент проведен на листах из сплава марки Д16-Т до (малая склонность) и после (высокая склонность) провоцирующей термообработки. Показано, что значения усталостной долговечности, как и глубины межкристаллитной коррозии, при одинаковом значении удельной величины количества электричества Q/S , но при разных значениях плотности токов анодного растворения различаются. Это свидетельствует о том, что удельную величину количества электричества нельзя использовать в качестве критерия.

Авторами данной статьи рекомендуется отойти от поиска критерия коррозионной повреждаемости и сосредоточиться на разработке методики, основанной на сопоставлении нанесения коррозионных повреждений ускоренным методом с натурными испытаниями. Работы в данном направлении обеспечили возможность нанесения питтинговых коррозионных повреждений, обладающих таким же фактором питтинговой коррозии [68], как и при натуральных испытаниях [43], и моделирования оценки потери предела прочности алюминиевых сплавов с различной склонностью к межкристаллитной коррозии с учетом результатов анализа коррозионных повреждений. Однако зависимости, полученные авторами работ [33, 44], определены экспериментально для сплава системы Al-Cu-Li и сплава марки 1370-T1 и не могут распространяться на остальные марки алюминиевых сплавов.

Заключения

Проведенный анализ научно-технической литературы позволяет определить следующие пути развития данного направления:

– дальнейшие работы в области нанесения коррозионных повреждений с использованием различных электрохимических режимов анодного растворения, обеспечивающих идентичность с коррозионными повреждениями, полученными при натуральных испытаниях;

– расширение подхода, принятого авторами работ [33, 44], на другие марки алюминиевых сплавов.

Первый путь представляется более эффективным, поскольку требует меньшего количества материальных и временных затрат.

Список источников

1. Смирнов Н.П. Формирование программы сохранения целостности конструкции планера воздушного судна по условиям прочности // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2008. № 127. С. 44–49.
2. Бутушин С.В., Семин А.В. Целостность элементов конструкции планера при длительной эксплуатации гражданских воздушных судов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2009. № 141. С. 30–37.
3. 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. № 1 (187). С. 83–91.
4. Лапаев А.В., Шапкин В.С. К вопросу оценки влияния коррозионных поражений планера на летную годность воздушных судов по условиям усталостной прочности // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4. С. 17–21.
5. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В. Анализ данных по натурным испытаниям алюминиевых сплавов и разработка их комплексных коррозионных испытаний // Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. «Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате». М.: ВИАМ, 2018. С. 80.
6. Гриневиц А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Долговечность изделий и коррозионная усталость конструкционных материалов // Вопросы материаловедения. 2013. Т. 1. № 73. С. 220.
7. Герасименко А.А., Ямпольская Т.Е. Расслаивающая коррозия алюминиевых сплавов. I. Причины возникновения и особенности развития процесса. Диагностика, моделирование, прогнозирование // Защита металлов. 2000. Т. 36. № 2. С. 195–202.
8. 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.
9. 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.
10. Игнатович С.Р., Карускевич М.В., Юцкевич С.С., Масляк Т.П. Ресурс и долговечность авиационной техники: учеб. пособие. Киев: НАУ, 2015. 18 с.
11. Тимофеев А.Н. Критерии коррозионного состояния авиационных конструкций // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2008. № 4. С. 141–154.
12. 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.
13. Тимофеев А.Н. Обзор методов оценки допустимости коррозионных повреждений авиационных конструкций // Новости материаловедения. Наука и техника. 2014. № 4. Ст. 04. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 07.02.2023).
14. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость и свойства алюминиевых сплавов авиационного назначения в условиях морского субтропического климата: дис. ... канд. тех. наук. М.: ВИАМ, 2006. 125 с.
15. Рудзей Г.Ф., Беженарь А.Н. Оценка надежности авиационной техники с эксплуатационными повреждениями с использованием методов статистического анализа // Политранспортные системы. 2020. № 11. С. 519–525.
16. Асадулина Е.Ю. К вопросу усталостного разрушения деталей авиационной техники // Избранные вопросы науки XXI века. 2021. № 6. С. 82–86.

17. Кадирбекова К.К., Хуршудян Д.Д. Типовые разрушения металлических конструкций авиационной техники // Транспорт шелкового пути. 2020. № 4. С. 29–31.
18. Плотников Н.И. Ресурсные противоречия безопасности воздушного транспорта // Проблемы безопасности полетов. 2010. № 10. С. 23–29.
19. Нестеренко Б.Г., Нестеренко Г.И. Живучесть самолетных конструкций // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2007. № 119. С. 57–69.
20. Нестеренко Б.Г. Требования по усталости и живучести конструкций гражданских самолетов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2011. № 163. С. 49–59.
21. Нестеренко Б.Г., Нестеренко Г.И. Проблемы усталости и живучести конструкций гражданских самолетов // Прочность конструкций летательных аппаратов. 2013. № 1. С. 85–86.
22. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
23. Гриневич А.В., Жирнов А.Д., Каримова С.А. Прогнозирование усталостной долговечности металлических материалов при коррозионном воздействии // Сб. докл. конф. «Гидроавиасалон–2010». М.: ОНТИ ЦАГИ, 2010. С. 38–45.
24. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Каримова С.А. Прочностные характеристики материалов планера самолетов в условиях влажности // Вопросы материаловедения. 2013. Т. 1. № 73. С. 212.
25. Курс М.Г., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Морозова Л.В. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 1 // Вопросы материаловедения. 2016. № 1 (85). С. 116–126.
26. Лапаев А.В. Методы оценки влияния коррозионных поражений планера на летную годность воздушных судов гражданской авиации: дис. ... док. техн. наук. Москва: Гос. науч.-исслед. ин-т гражд. авиации, 2013. 74 с.
27. Кузякина В.А., Толеуханов А.Д. Проблема перехода на систему ремонта воздушного судна по фактическому техническому состоянию // Прогрессивные технологии в транспортных системах. 2019. № 14. С. 332–336.
28. 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.
29. Старцев О.В., Молоков М.В., Медведев И.М., Ерофеев В.Т. Определение влияния атмосферы на строительные элементы сенсорами температуры, влажности и коррозии // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 3. С. 61–68.
30. Ерофеев В.Т., Смирнов И.В., Воронов П.В. и др. Исследование стойкости полимерных покрытий в условиях воздействия климатических факторов черноморского побережья // Фундаментальные исследования. 2016. № 11 (часть 5). С. 911–924.
31. Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Бакшаев С.И., Абрамова М.Г. Проведение натурных климатических испытаний для подтверждения сохраняемости служебных характеристик конструктивно-подобных элементов, деталей и узлов авиационной техники в течение всего жизненного цикла // XII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» – «Современные аспекты в области исследований структурно-фазовых превращений при создании материалов нового поколения». М.: ВИАМ, 2020. С. 479–488.
32. Ветрова Е.Ю., Щекин В.К., Курс М.Г. Сравнительная оценка методов определения коррозионной агрессивности атмосферы // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
33. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.

34. Борисов С.П. Прогнозирование эксплуатационной циклической повреждаемости легких сплавов в элементах конструкций воздушных судов: дис. ... док. техн. наук. М.: МГТУ ГА, 1998. 130 с.
35. Рыбков А.В., Герасимова Д.С. Оценка влияния коррозионных повреждений на характеристики длительно эксплуатируемых летательных аппаратов // Решетневские чтения. 2013. Т. 1. № 17. С. 375–377.
36. 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.
37. Зубков Б.В., Скрипченко А.С. Научно-методические основы построения процедур контроля летной годности воздушных судов при эксплуатации // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2005. № 86. С. 10–17.
38. Белов В.К., Тимофеев А.Н. Анализ характеристик коррозионных повреждений, необходимых для оценки остаточной усталостной долговечности авиационных конструкций // Авиационная промышленность. 2011. № 3. С. 37–42.
39. Тимофеев А.Н., Белов В.К., Корелина О.В. Оценка допустимости коррозионного повреждения элемента конструкции // Авиационная промышленность. 2012. № 2. С. 12.
40. Каримова С.А., Кутырев А.Е., Фомина М.А., Чесноков Д.В. Моделирование процесса воздействия агрессивных компонентов промышленной атмосферы на металлические материалы в камере солевого тумана // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-86-94.
41. Гриневич А.В., Каримова С.А., Чесноков Д.В. Поиск эквивалента коррозионной повреждаемости при оценке усталостной долговечности конструкционных металлических материалов // Сб. докл. конф. «Гидроавиасалон–2012». М.: ЦАГИ, 2012. С. 264–266.
42. Кузин Я.С., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Кутырев А.Е. Учет временного фактора при нанесении коррозионных поражений на алюминиевые сплавы электрохимическим методом // Сб. докл. науч.-технич. конф. «Металловедение и современные разработки в области технологии литья, деформации и термической обработки легких сплавов». М., 2016. С. 26.
43. 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. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
44. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Вдовин А.И. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевых сплавов с невысокой склонностью к МКК на примере сплава системы Al–Li–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // Труды ВИАМ. 2021. № 2 (96). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.03.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-109-118.
45. Bellingier N.C., Liao M. Corrosion and fatigue modeling of aircraft structures // Corrosion Control in the Aerospace Industry. 2009. Vol. 2. P. 172–191.
46. Li L., Chakik M., Prakash R. A review of corrosion in aircraft structures and graphene-based sensors for advanced corrosion monitoring // Sensors. 2021. Vol. 21. No. 9. P. 2908.
47. Crawford B.R., Sharp R.K. Equivalent Crack Size Modelling of Corrosion Pitting in an AA7050-T7451 Aluminium Alloy and its Implications for Aircraft Structural Integrity. Victoria: Defense Science and Technology Organization, 2012. 82 p.
48. Lincoln J.W. Corrosion and fatigue: Safety issue or economic issue // USAF Aircraft Structural Integrity Program-ASIP. 1998. Vol. 98. P. 1–3.
49. Shlyannikov V., Sulamanidze A., Yarullin R. Fatigue and creep-fatigue crack growth in aviation turbine disk simulation models under variable amplitude loading // Engineering Failure Analysis. 2022. Vol. 131. P. 105886.
50. Nejad R.M., Berto F., Wheatley G., Tohidi M. et al. On fatigue life prediction of Al-alloy 2024 plates in riveted joints // Structures. 2021. Vol. 33. P. 1715–1720.

51. Dubinsky V.S, Senik V.Y. Estimation of the Corrosion Damage of the Airplanes in Operation by Means of Mathematical Statistics (TsAGI) // I Report for joint workshop held in Milan university. Milan, 2006. 31 p.
52. Chubb J.P., Morad T.A., Hockenhull B.S., Bristow J.W. The effect of exfoliation corrosion on the fracture and fatigue behaviour of 7178-T6 aluminium // *International Journal of fatigue*. 1995. Vol. 17. No. 1. P. 49–54.
53. Qiu Y., Liu R., Zou L., Chi H. Influence of grain boundary precipitates on intergranular corrosion behavior of 7050 Al alloys // *Coatings*. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 249.
54. Shapkin V.S., Laptev A.V., Matveev K.A. et al. Analytical-Experimental Evaluation of the Fatigue Resistance for Aircraft Fuselage Skin in the Case of Corrosion Damage // *Russian Aeronautics*. 2021. Vol. 64. P. 181–188.
55. 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.
56. Mills T., Sharp P.K., Loader C. The incorporation of pitting corrosion damage into F-111 fatigue life modelling. Canberra: Defense Science and Technology Organization Canberra, 2002. 45 p.
57. Russo S., Sharp P.K., Dhamari R., Mills T.B. The influence of the environment and corrosion on the structural integrity of aircraft materials // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2009. Vol. 32. No. 6. P. 464–472.
58. Mills T., Clark G., Loader C., Sharp P.K. Review of F-111 structural materials. Victoria: Defense Science And Technology Organization, 2001. 35 p.
59. Scheuring J.N., Grandt Jr.A.F. Mechanical properties of aircraft materials subjected to long periods of service usage. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1997. Vol. 119 (4). P. 380–386.
60. Molent L. A review of equivalent precrack sizes in aluminium alloy 7050-T7451 // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2014. Vol. 37. No. 10. P. 1055–1074.
61. Huang Y., Ye X., Hu B., Chen L. Equivalent crack size model for pre-corrosion fatigue life prediction of aluminum alloy 7075-T6 // *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 88. P. 217–226.
62. Kim S., Burns J.T., Gangloff R.P. Fatigue crack formation and growth from localized corrosion in Al–Zn–Mg–Cu // *Engineering Fracture Mechanics*. 2009. Vol. 76. No. 5. P. 651–667.
63. Correia J.A.F.O., Blason S., De Jesus A.M.P. et al. Fatigue life prediction based on an equivalent initial flaw size approach and a new normalized fatigue crack growth model // *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 69. P. 15–28.
64. Alves A.S.F., Sampayo L.M.C.M.V., Correia J.A.F.O. et al. Fatigue life prediction based on crack growth analysis using an equivalent initial flaw size model: Application to a notched geometry // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 114. P. 730–737.
65. Zhao T., Liu Z., Du C. et al. Modeling for corrosion fatigue crack initiation life based on corrosion kinetics and equivalent initial flaw size theory // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 142. P. 277–283.
66. Liu Y., Mahadevan S. Probabilistic fatigue life prediction using an equivalent initial flaw size distribution // *International Journal of Fatigue*. 2009. Vol. 31. No. 3. P. 476–487.
67. Cole G.K., Clark G., Sharp P.K. The Implications of Corrosion with respect to Aircraft Structural Integrity. Melbourne Aeronautical and Maritime Research Lab., 1997. 56 p.
68. Bernard S., Covino Jr. Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection: ASM Handbook. ASM International, 2003. Vol. 13A. P. 1135.
69. Sharp P.K., Mills T.B., Clark G. Modeling of fatigue crack growth from pitting and exfoliation corrosion. Toulouse: International Committee on Aeronautical Fatigue, 2001. 21 p.

References

1. Smirnov N.P. Formation of a program for maintaining the integrity of the aircraft airframe structure according to strength conditions. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2008, no. 127, pp. 44–49.

2. Butushin S.V., Semin A.V. The integrity of airframe structural elements during long-term operation of civil aircraft. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2009, no. 141, pp. 30–37.
3. Feigenbaum Yu.M., Dubinsky S.V. Influence of accidental operational damage on the strength and service life of aircraft structures. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2013, no. 1 (187), pp. 83–91.
4. Lapaev A.V., Shapkin V.S. On the issue of assessing the effect of airframe corrosion damage on the airworthiness of aircraft in terms of fatigue strength. *Nauchnyy vestnik GosNII GA*, 2014, no. 4, pp. 17–21.
5. Kutuyev A.E., Chesnokov D.V. Analysis of data on field tests of aluminum alloys and the development of their complex corrosion tests. Materials of the III Intern. sci.-tech. conf. "Corrosion, Aging, and Biostability of Materials in Marine Climates". Moscow: VIAM, 2018, p. 80.
6. Grinevich A.V., Lutsenko A.N., Karimova S.A. Durability of products and corrosion fatigue of structural materials. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, vol. 1, no. 73, p. 220.
7. Gerasimenko A.A., Yampolskaya T.E. Exfoliating corrosion of aluminum alloys. I. Causes of occurrence and features of the development of the process. Diagnostics, modeling, forecasting. *Zashchita metallov*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 195–202.
8. Kablov E.N., Karimova S.A., Semenova L.V. Corrosion activity of carbon plastics and protection of metal load-bearing structures in contact with carbon fiber. *Korroziya: materialy, zashchita*, 2011, no. 12, pp. 1–7.
9. Karimova S.A., Pavlovskaya T.G., Chesnokov D.V., Semenova L.V. Corrosion activity of carbon plastics and protection of metal load-bearing structures in contact with carbon fiber. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 110–116.
10. Ignatovich S.R., Karuskevich M.V., Yutskevich S.S., Maslyak T.P. *Resource and durability of aviation equipment*: textbook. Kyiv: NAU, 2015, 18 p.
11. Timofeev A.N. Criteria for the corrosion state of aircraft structures. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 4, pp. 141–154.
12. Zubarev A.P., Lapaev A.V., Lapaev V.P. Using a generalized parameter of corrosion damage to assess the durability of structural elements with corrosion damage. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2007, no. 119, pp. 30–32.
13. Timofeev A.N. Review of methods for assessing the admissibility of corrosion damage to aircraft structures. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2014, no. 4, paper no. 04. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: February 07, 2023).
14. Semenychev V.V. Corrosion resistance and properties of aluminum alloys for aviation purposes in a marine subtropical climate: Cand. Sc. (Tech.). Moscow: VIAM, 2006, 125 p.
15. Rudzey G.F., Bezhenar A.N. Reliability assessment of aviation equipment with operational damage using statistical analysis methods. *Politransportnye sistemy*, 2020, no. 11, pp. 519–525.
16. Asadulina E.Yu. On the issue of fatigue failure of aircraft parts. *Izbrannye voprosy nauki XXI veka*, 2021, no. 6, pp. 82–86.
17. Kadirbekova K.K., Khurshudyan D.D. Typical destruction of metal structures of aviation equipment. *Transport shelkovogo puti*, 2020, no. 4, pp. 29–31.
18. Plotnikov N.I. Resource contradictions of air transport safety. *Problemy bezopasnosti poletov*, 2010, no. 10, pp. 23–29.
19. Nesterenko B.G., Nesterenko G.I. Survivability of aircraft structures. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2007, no. 119, pp. 57–69.
20. Nesterenko B.G. Requirements for fatigue and survivability of civil aircraft structures. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2011, no. 163, pp. 49–59.
21. Nesterenko B.G., Nesterenko G.I. Problems of fatigue and survivability of civil aircraft structures. *Prochnost konstruktsiy letatelnykh apparatov*, 2013, no. 1, pp. 85–86.

22. Abramova M.G., Lutsenko A.N., Varchenko E.A. Concerning the aspects of validation of climate resistance of airborne materials at all life cycle stages (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
23. Grinevich A.V., Zhirnov A.D., Karimova S.A. Predicting the fatigue life of metallic materials under corrosive action. *Reports conf. "Hydro-Aviasalon-2012"*. Moscow: TsAGI, 2010, pp. 38–45.
24. Lutsenko A.N., Grinevich A.V., Karimova S.A. Strength characteristics of aircraft airframe materials under humid conditions. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, vol. 1, no. 73, p. 212.
25. Kurs M.G., Laptev A.B., Kuttyrev A.E., Morozova L.V. Investigation of corrosion failure of deformable aluminum alloys during full-scale accelerated tests. Part 1. *Voprosy materialovedeniya*, 2016, no. 1 (85), pp. 116–126.
26. Lapaev A.V. *Methods for assessing the effect of airframe corrosion damage on the airworthiness of civil aviation aircraft*: Dr. Sc. (Tech.). Moscow: State scientific research Institute of Civil aviation, 2013, 74 p.
27. Kuzyakina V.A., Toleukhanov A.D. The problem of transition to an aircraft repair system according to the actual technical condition. *Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh*, 2019, no. 14, pp. 332–336.
28. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M., Shelemba I.S. Fiber optic sensors for monitoring corrosion processes in units of aviation engineering (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. 3 (48), pp. 26–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34.
29. Startsev O.V., Molokov M.V., Medvedev I.M., Erofeev V.T. Determination of the influence of the atmosphere on building elements by sensors of temperature, humidity and corrosion. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2017, no. 3, pp. 61–68.
30. Erofeev V.T., Smirnov I.V., Voronov P.V. et al. Study of the resistance of polymer coatings under the influence of climatic factors of the Black Sea coast. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, no. 11 (part 5), pp. 911–924.
31. Laptev A.B., Prokopenko A.N., Bakshaev S.I., Abramova M.G. Carrying out full-scale climatic tests to confirm the persistence of service characteristics of structurally similar elements, parts and assemblies of aviation equipment throughout the entire life cycle. *XII All-Rus. conf. on testing and research of the properties of materials "TestMat" – "Modern aspects in the field of research of structural-phase transformations in the creation of new generation materials"*. Moscow: VIAM, 2020, pp. 479–488.
32. Vetrova E.Yu., Shchekin V.K., Kurs M.G. Comparative evaluation of methods for the determination of corrosion aggressivity of the atmosphere. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 74–81. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81.
33. Kablov E.N., Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kuttyrev A.E. Application of Al–Mg–Si–Cu system aluminum alloy combined anodic dissolution for prognosis of tensile strength loss during natural exposure testing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
34. Borisov S.P. Forecasting of operational cyclic damage of light alloys in aircraft structural elements: thesis, Dr. Sc. (Tech.). Moscow: MGTU GA, 1998, 130 p.
35. Rybkov A.V., Gerasimova D.S. Evaluation of the influence of corrosion damage on the characteristics of long-term operated aircraft. *Reshetnevskiy chteniya*, 2013, vol. 1, no. 17, pp. 375–377.
36. Lapaev A.V., Shapkin V.S., Volchek V.A. Study of corrosion damage to elements of aircraft structures of Tu-154, Il-86 aircraft. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2006, no. 100, pp. 25–28.
37. Zubkov B.V., Skripchenko A.S. Scientific and methodological foundations for constructing procedures for airworthiness control of aircraft during operation. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii*, 2005, no. 86, pp. 10–17.
38. Belov V.K., Timofeev A.N. Analysis of the characteristics of corrosion damage required to assess the residual fatigue life of aircraft structures. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2011, no. 3, pp. 37–42.
39. Timofeev A.N., Belov V.K., Korelina O.V. Evaluation of the admissibility of corrosion damage to a structural element. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2012, no. 2, p. 12.

40. Karimova S.A., Kutyrav A.E., Fomina M.A., Chesnokov D.V. Modeling of process of influence of aggressive components of the industrial atmosphere on metal materials in the salt spray chamber. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-86-94.
41. Grinevich A.V., Karimova S.A., Chesnokov D.V. Search for the equivalent of corrosion damage when assessing the fatigue durability of structural metal materials. *Reports conf. "Hydro-Aviasalon-2012"*. Moscow: TsAGI, 2012, pp. 264–266.
42. Kuzin Ya.S., Chesnokov D.V., Antipov V.V., Kutyrav A.E. Accounting for a temporary factor when applying corrosion lesions to aluminum alloys by an electrochemical method. *Report Scientific and Technical. Conf. "Metal science and modern developments in the field of casting technology, deformation and thermal processing of light alloys"*. Moscow, 2016, p. 26.
43. Kutyrav 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: March 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
44. Kutyrav A.E., Chesnokov D.V., Antipov V.V., Vdovin A.I. A study of the use of combined anodic dissolution of aluminum alloys with not high sensibility to IGC evidence from alloy of Al–Li–Cu system with the purpose of predicting loss of mechanical properties at atmospheric corrosion. *Trudy VIAM*, 2021, no. 2 (96), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March, 21, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-109-118.
45. Bellinger N.C., Liao M. Corrosion and fatigue modeling of aircraft structures. *Corrosion Control in the Aerospace Industry*, 2009, vol. 2, pp. 172–191.
46. Li L., Chakik M., Prakash R. A review of corrosion in aircraft structures and graphene-based sensors for advanced corrosion monitoring. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 9, p. 2908.
47. Crawford B.R., Sharp R.K. *Equivalent Crack Size Modelling of Corrosion Pitting in an AA7050-T7451 Aluminium Alloy and its Implications for Aircraft Structural Integrity*. Victoria: Defense Science and Technology Organization, 2012, 82 p.
48. Lincoln J.W. Corrosion and fatigue: Safety issue or economic issue. *USAF Aircraft Structural Integrity Program-ASIP*, 1998, vol. 98, pp. 1–3.
49. Shlyannikov V., Sulamanidze A., Yarullin R. Fatigue and creep-fatigue crack growth in aviation turbine disk simulation models under variable amplitude loading. *Engineering Failure Analysis*, 2022, vol. 131, p. 105886.
50. Nejad R.M., Berto F., Wheatley G., Tohidi M. et al. On fatigue life prediction of Al-alloy 2024 plates in riveted joints. *Structures*, 2021, vol. 33, pp. 1715–1720.
51. Dubinsky V.S., Senik V.Y. Estimation of the Corrosion Damage of the Airplanes in Operation by Means of Mathematical Statistics (TsAGI). *I Report for joint workshop held in Milan university*, Milan, 2006, 31 p.
52. Chubb J.P., Morad T.A., Hockenhull B.S., Bristow J.W. The effect of exfoliation corrosion on the fracture and fatigue behaviour of 7178-T6 aluminium. *International Journal of fatigue*, 1995, vol. 17, no. 1, pp. 49–54.
53. Qiu Y., Liu R., Zou L., Chi H. Influence of grain boundary precipitates on intergranular corrosion behavior of 7050 Al alloys. *Coatings*, 2022, vol. 12, no. 2, p. 249.
54. Shapkin V.S., Laptev A.V., Matveev K.A. et al. Analytical-Experimental Evaluation of the Fatigue Resistance for Aircraft Fuselage Skin in the Case of Corrosion Damage. *Russian Aeronautics*, 2021, vol. 64, pp. 181–188.
55. 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.
56. Mills T., Sharp P.K., Loader C. *The incorporation of pitting corrosion damage into F-111 fatigue life modelling*. Canberra: Defense Science and Technology Organization Canberra, 2002, 45 p.
57. Russo S., Sharp P.K., Dhamari R., Mills T.B. The influence of the environment and corrosion on the structural integrity of aircraft materials. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2009, vol. 32, no. 6, pp. 464–472.

58. Mills T., Clark G., Loader C., Sharp P.K. *Review of F-111 structural materials*. Victoria: Defense Science and Technology Organization, 2001, 35 p.
59. Scheuring J.N., Grandt Jr.A.F. Mechanical properties of aircraft materials subjected to long periods of service usage. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1997, vol. 119 (4), pp. 380–386.
60. Molent L. A review of equivalent precrack sizes in aluminium alloy 7050-T7451. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, vol. 37, no. 10, pp. 1055–1074.
61. Huang Y., Ye X., Hu B., Chen L. Equivalent crack size model for pre-corrosion fatigue life prediction of aluminum alloy 7075-T6. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 88, pp. 217–226.
62. Kim S., Burns J.T., Gangloff R.P. Fatigue crack formation and growth from localized corrosion in Al–Zn–Mg–Cu. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, vol. 76, no. 5, pp. 651–667.
63. Correia J.A.F.O., Blason S., De Jesus A.M.P. et al. Fatigue life prediction based on an equivalent initial flaw size approach and a new normalized fatigue crack growth model. *Engineering Failure Analysis*, 2016, vol. 69, pp. 15–28.
64. Alves A.S.F., Sampayo L.M.C.M.V., Correia J.A.F.O. et al. Fatigue life prediction based on crack growth analysis using an equivalent initial flaw size model: Application to a notched geometry. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 114, pp. 730–737.
65. Zhao T., Liu Z., Du C. et al. Modeling for corrosion fatigue crack initiation life based on corrosion kinetics and equivalent initial flaw size theory. *Corrosion Science*, 2018, vol. 142, pp. 277–283.
66. Liu Y., Mahadevan S. Probabilistic fatigue life prediction using an equivalent initial flaw size distribution. *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, no. 3, pp. 476–487.
67. Cole G.K., Clark G., Sharp P.K. *The Implications of Corrosion with respect to Aircraft Structural Integrity*. Melbourne Aeronautical and Maritime Research Lab., 1997, 56 p.
68. Bernard S., Covino Jr. *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*: ASM Handbook. ASM International, 2003, vol. 13A, p. 1135.
69. Sharp P.K., Mills T.B., Clark G. *Modeling of fatigue crack growth from pitting and exfoliation corrosion*. Toulouse: International Committee on Aeronautical Fatigue, 2001, 21 p.

Информация об авторах

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

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

Ямщиков Евгений Игоревич, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

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

Evgeny I. Yamshchikov, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 20.06.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 23.06.2023.
The article was submitted 20.06.2023; approved and accepted for publication after reviewing 23.06.2023.