
Научная статья

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-135-144

ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА СКОРОСТЬ РОСТА ТРЕЩИНЫ УСТАЛОСТИ В КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЕ (обзор)

М.А. Горбовец¹, И.А. Ходинев¹, С.А. Монин¹

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

Аннотация. Рассматриваются методы испытаний сталей и сплавов на скорость роста трещины усталости при воздействии коррозионно-активной среды. Данные испытания проводят преимущественно при одновременном механическом и коррозионном воздействии на компактных образцах внецентренного растяжения. Состав среды определяется условиями эксплуатации изделия. В большинстве случаев используют растворы NaCl различной концентрации. Скорость роста трещины усталости крайне чувствительна к параметрам испытательной среды и механического нагружения.

Ключевые слова: скорость роста трещины усталости, коррозия, металлы, усталость, агрессивное воздействие среды, циклическая трещиностойкость

Для цитирования: Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Испытания конструкционных металлических материалов на скорость роста трещины усталости в коррозионно-активной среде (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 12 (118). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-135-144.

Scientific article

TESTS OF STRUCTURAL METALLIC MATERIALS FOR THE FATIGUE CRACK GROWTH RATE IN A CORROSIVE ENVIRONMENT (review)

M.A. Gorbovets¹, I.A. Khodinev¹, S.A. Monin¹

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

Abstract. Considers methods for testing steels and alloys for the fatigue crack growth rate when exposed to a corrosive environment. Preferably, these tests are carried out under simultaneous mechanical and corrosion action on compact eccentric tensile specimens. The composition of the environment is determined by the operating conditions of the product. In most cases, NaCl solutions of various concentrations are used. Fatigue crack growth rate is extremely sensitive to the parameters of the test environment and mechanical loading.

Keywords: fatigue crack growth rate, corrosion, metals, fatigue, aggressive environment, cyclic crack resistance

For citation: Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Tests of structural metallic materials for the fatigue crack growth rate in a corrosive environment (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 12 (118), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-12-135-144.

Введение

Наличие трещины может существенно снизить прочность детали из-за хрупкого разрушения. Однако наличие трещины опасного размера – явление редкое, обычно вызываемое дефектом материала. В более распространенной ситуации небольшой дефект, который изначально присутствовал, затем развивается в трещину и растет до тех пор, пока не достигнет критического размера для хрупкого разрушения.

Анализ и прогнозирование роста усталостных трещин имеют большое значение для крупных инженерных конструкций и механизмов, особенно там, где важнейшим фактором является безопасность, например для самолетов и компонентов атомных электростанций.

Часто требуется инженерный анализ роста трещины, который может быть выполнен с использованием концепции интенсивности напряжений механики разрушения. Коэффициент интенсивности напряжений (КИН) количественно характеризует напряженное состояние в окрестности вершины трещины, зависит от ее длины, нагрузки, геометрической формы и определяется выражением

$$K = \sigma F \cdot \sqrt{\pi a}, \quad (1)$$

где K – КИН; a – длина трещины; σ – номинальное напряжение; F – функция, характеризующая геометрическую форму образца или изделия.

Для исследования скорости роста трещины усталости (СРТУ) проводят испытания стандартных образцов, обычно имеющих надрез, что позволяет контролировать место зарождения трещины. Перед проведением испытания на СРТУ производят выращивание предварительной трещины усталости, а далее осуществляют само испытание – циклически нагружают образец и фиксируют изменение длины трещины. Подробнее процедура описана в соответствующих нормативных документах – ОСТ 1 92127–90 [1] и ASTM E647 [2].

По результатам испытания на СРТУ в двойных логарифмических координатах строят кинетическую диаграмму усталостного разрушения, демонстрирующую зависимость скорости от КИН. Для большинства металлических материалов эту диаграмму можно разделить на три участка. Второй участок – линейный (или участок стабильного роста трещины), его описывают уравнением Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad (2)$$

где N – количество циклов нагружения; ΔK – размах КИН (разность максимального и минимального значений); C и n – константы материала, определяемые при проведении испытаний. Для определения СРТУ выполняется численное дифференцирование.

Рост трещины может быть вызван циклическим нагружением – это называется ростом усталостной трещины. Однако если присутствует агрессивная химическая среда, даже постоянная нагрузка может вызвать рост трещин. Оба типа роста трещин возникают в том случае, если циклические нагрузки прилагаются в присутствии неблагоприятной среды.

Существует несколько физических механизмов этого процесса. Одним из них является коррозионное растрескивание под напряжением, когда удаление материала в результате коррозии в воде, соленой воде или другой жидкости способствует росту трещины. В других случаях коррозия отсутствует – например, при растрескивании сталей из-за водородного охрупчивания.

В случаях возникновения коррозии охрупчивающее вещество, по-видимому, усиливает разрыв химических связей в высоконапряженной области вершины трещины.

Охрупчивание и, следовательно, рост трещин могут происходить даже там, где коррозионно-активное вещество не присутствует во внешней среде, а находится в твердом растворе в материале, что иногда имеет место при водородном растрескивании металлов. Кроме того, даже влага и газы в воздухе могут вызывать рост трещин в некоторых материалах.

На практике, в частности в судостроительной, авиационной и нефтедобывающей промышленности, часто реализуется комбинация повторных циклических нагрузок и агрессивного воздействия коррозионно-активной среды на элементы конструкций [3–8]. Многие металлы, такие как титан, коррозионноустойчивые, высокопрочные и алюминиевые сплавы, устойчивы к коррозионному воздействию, но уязвимы по отношению к коррозионно-механическому воздействию, в связи с чем проводятся (в том числе сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ) исследования механических свойств конструкционных материалов в условиях агрессивного воздействия окружающей среды и таким образом моделируются эксплуатационные условия [9–11].

Для прогнозирования роста усталостных трещин изделий, эксплуатируемых в условиях агрессивной среды, необходимо проводить испытания на СРТУ в коррозионно-активных средах. Рассматриваемый тип испытаний является востребованным, однако сложным в техническом и экономическом плане, что затрудняет унификацию и регламентацию условий его выполнения. В данной работе проведена систематизация имеющейся информации, а также выявлены основные тенденции развития методов испытаний сталей и сплавов на СРТУ при воздействии коррозионно-активной среды, включая интерпретацию результатов этих испытаний. Рассматриваются исключительно методы испытаний лабораторных образцов, а не деталей.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследование материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

Материалы и методы

Для проведения исследования методов испытаний конструкционных материалов на СРТУ проанализированы охранные и нормативные документы, регламентирующие или рекомендуемые условия осуществления соответствующих испытаний, а также статьи в научных журналах, отражающие опыт их реализации.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют отечественные утвержденные нормативные документы, регламентирующие условия проведения испытаний на СРТУ в коррозионно-активной среде. В стандарте ASTM E647 имеется раздел, посвященный такому типу испытаний.

Ввиду неэффективности патентования методов физико-механических испытаний в коррозионно-активной среде большинство организаций-разработчиков не осуществляет патентование результатов интеллектуальной деятельности, полученных в данной области, однако запатентованные методы проведения испытаний на СРТУ в коррозионно-активной среде существуют.

Значительная часть рассмотренных научных статей являются публикациями в ведущих журналах по соответствующей тематике, таких как *Corrosion Science*, *International Journal of Fatigue*, *Materials and Corrosion*, *Materials Science and Engineering*.

Результаты и обсуждение

Образец и оборудование для испытаний

Геометрические размеры образца оказывают влияние на СРТУ [13]. В большинстве рассмотренных работ показано, что для испытаний материалов на СРТУ в коррозионно-

активных средах используют прямоугольный компактный образец внецентренного растяжения, рекомендованный нормативными документами ASTM E647 и ОСТ 1 92127–90. В единичных случаях проводят испытания в условиях трехточечного изгиба на соответствующем образце [14]. В работе [15] показано, что на образце, имеющем прямоугольное сечение рабочей части и цилиндрическое отверстие, регистрировалось продвижение усталостной трещины для дальнейшего построения кинетической диаграммы усталостного разрушения.

Поскольку испытания проводятся в климатической камере, содержащей водный раствор, который, как правило, скрывает трещину, в качестве основного метода регистрации изменения ее длины применяют невизуальные методы. Тем не менее оптическое наблюдение вершины трещины используют как вспомогательное средство для измерения размера трещины и как средство контроля ее морфологии, особенно разветвления трещины или растрескивания вне плоскости. Это свидетельствует о том, что испытание является недействительным.

При использовании невизуального метода снижения потенциала электрохимические эффекты (если они сохраняются в течение длительного времени) могут либо увеличивать, либо уменьшать СРТУ в водной среде [16, 17].

В работе [18] показано, что при проведении испытания на СРТУ в морской воде длину трещины измеряли с помощью тензодатчиков, прикрепленных к задней поверхности образца. Данный метод предварительно верифицировали при проведении испытания на воздухе (на одном и том же образце установили и тензодатчики, и экстензометр на задней и передней поверхностях соответственно).

Два подхода к проведению испытаний

Анализ научно-технической литературы показал, что существует два подхода ко всем проводимым испытаниям на СРТУ:

- последовательное нанесение коррозионных повреждений и дальнейшее механическое нагружение;
- непосредственное воздействие коррозионно-активной среды в течение всего испытания.

Первый подход привлекателен тем, что обладает следующими преимуществами: он более простой в реализации (в техническом смысле), позволяет исследовать нанесенные коррозионные повреждения перед проведением испытания, а также дает возможность нанести коррозионные повреждения, максимально приближенные к реальным и воспринимаемые соответствующим элементом детали или конструкции (без использования чрезвычайно агрессивных сред для ускорения процесса). Например, в работе [15] показано, как на образец из алюминиевого сплава нанесено предварительное коррозионное повреждение при помощи введения следующего раствора: AlCl_3 в количестве 0,1 М + NaCl в количестве 0,86 М, после чего произведено механическое нагружение. При этом размер питтинга являлся контролируемым параметром испытания. Однако чаще применяют такой подход при проведении испытаний на многоцикловую усталость, а при испытаниях на СРТУ в большинстве случаев используют второй подход – испытания при непосредственном воздействии агрессивной среды. Это можно объяснить тем, что при проведении испытаний на многоцикловую усталость наиболее интересен процесс инициации и образования усталостной трещины. Быстрота данного процесса, вызванного предварительным воздействием коррозионно-активной среды, зависит прежде всего от концентратора напряжений. Однако при исследовании СРТУ важен процесс динамического распространения макротрещины, предварительно нанесенное коррозионное повреждение не оказывает непосредственного влияния на уже продвинувшуюся вглубь образца вершину трещины.

Параметры коррозионно-активной среды

Изменение внешних условий наиболее существенно сказывается на процессах локального разрушения в вершине трещины. Поэтому зависимость скорости роста трещин от внешних параметров является наиболее чувствительной и точной характеристикой свойств системы «материал–среда» [19]. Как правило, в патентах на методы испытаний не указывается конкретная испытательная среда, выбор проводится в зависимости от условий эксплуатации изделия. В стандарте ASTM E647 характеристики водной среды также не регламентируются. При указании на испытательную среду обычно приведены водные растворы хлоридов – при полном погружении образцов (охранные документы [20–23]) или при их орошении (охранные документы [24–25]).

В большинстве публикаций тоже в качестве как минимум одной из испытательных сред наиболее часто встречается раствор NaCl. Для оценки влияния коррозионно-активной среды на СРТУ проводят сравнительные испытания на воздухе или в дистиллированной воде.

Параметры испытания

Скорость роста трещины усталости в водной среде зависит от большого количества параметров испытания – частоты, истории и формы нагружения, размаха КИН, коэффициента асимметрии, геометрических размеров образца и усталостной трещины, а также от температуры испытания. Причем данные параметры могут оказывать достаточно существенное влияние на результат испытания [26–31].

Например, при исследовании влияния частоты нагружения (в диапазоне от 0,1 до 10 Гц) на результаты коррозионно-механических испытаний в 3,5%-ном растворе NaCl [29] установлено, что при испытаниях в растворе NaCl в диапазоне от 2,5 до 10 Гц СРТУ не зависит от частоты и ее значения более высокие, чем на воздухе. При частотах нагружения в диапазоне от 0,1 до 1 Гц скорость меньше, чем для более высоких частот, а наклон da/dN относительно ΔK близок к значениям, наблюдаемым при испытаниях на воздухе или в дистиллированной воде.

В публикации [30] исследовано влияние на СРТУ следующих факторов: температуры (55 и 85 °С), относительной влажности (55 и 85 %) и наличия или отсутствия нанесения хлоридов в виде раствора NaCl в количестве 1 М. Определено, что наиболее значимыми факторами являются температура и наличие хлоридов, в то время как уровень относительной влажности не оказывает существенного влияния на СРТУ.

В статье [31] показано, что дальнейшее развитие или прекращение роста трещины усталости при коррозионно-механических испытаниях зависят от факторов нагружения, которые или способствуют ее увеличению (проникновение водорода) или замедляют его (образование оксидов в вершине трещины).

В работе [18] исследовано влияние коэффициента асимметрии цикла и частоты нагружения на СРТУ сплава API 5L X56 в морской воде. Определено, что снижение частоты нагружения и повышение коэффициента асимметрии приводят к возрастанию СРТУ.

Интерпретация результатов испытаний

При создании математической модели, описывающей СРТУ материала в водной среде, используют различные подходы. Однако наиболее часто встречается уточнение уравнения Пэриса (2) – добавление дополнительного слагаемого, характеризующего изменение скорости, вызванное воздействием коррозионно-активной среды.

В публикации [32] представлена классификация СРТУ с использованием порогового значения КИН (K_{1sc}), меньше которого не происходит коррозионно-механическое

растрескивание. В зависимости от соотношения максимального КИН (K_{max}) и K_{Isc} могут быть реализованы три механизма роста трещины. При $K_{max} \leq K_{Isc}$ повышение СРТУ вызвано исключительно эффектами среды, такими как питтинги и отслоения (истинная коррозионная усталость). При $K_{max} > K_{Isc}$ возрастание СРТУ вызвано взаимосвязанной комбинацией трех факторов: контактом с коррозионно-активной средой, податливостью материала и растягивающим напряжением. При дальнейшем увеличении максимального значения КИН ($K_{max} \gg K_{Isc}$) наблюдается однозначное влияние частоты нагружения – она вызывает увеличение СРТУ и присутствует в предложенной модели в явном виде. Для каждого из трех случаев предложена модель, позволяющая прогнозировать СРТУ с использованием определенного алгоритма расчета. Верификация модели проведена на компактных образцах внецентренного растяжения, полученных разными способами (литье, селективное лазерное сплавление) из титанового сплава ТА6V.

В охранном документе [20] предложена математическая модель, входными параметрами которой являются СРТУ при нормальных условиях и несколько значений данной характеристики при различных скоростях потока морской воды.

В статье [33] также предложена модель, описывающая СРТУ в коррозионно-активной среде модифицированным уравнением Пэриса (2):

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K}{1 - D_{cor}} \right)^n, \quad (3)$$

где D_{cor} – добавленный в уравнение Пэриса параметр коррозионного повреждения, который зависит от свойств материала, среды испытания, нагрузки и текущего количества циклов нагружения. Верификация модели проведена на конструкционной стали, погруженной в 3,5%-ный раствор NaCl.

Заключения

Рассмотрены методы, применяемые отечественными и зарубежными исследователями для определения СРТУ конструкционных металлических материалов в коррозионно-активных средах. Условия проведения испытаний весьма различны, что обусловлено разными условиями эксплуатации деталей, для которых предназначены исследуемые материалы. Однако выявлены следующие тенденции и закономерности:

- в большинстве случаев испытание на СРТУ проводят при непосредственном коррозионном воздействии без нанесения предварительных коррозионных повреждений;
- для проведения испытаний чаще всего используют компактный образец внецентренного растяжения в соответствии со стандартом ASTM E647;
- состав коррозионно-активной среды определяется условиями эксплуатации изделия, наиболее распространенной средой является раствор NaCl;
- при создании математической модели, описывающей СРТУ материала в среде, используют различные подходы, однако наиболее часто встречается уточнение уравнения Пэриса (2) – добавление дополнительного слагаемого, характеризующего изменение СРТУ, вызванное воздействием коррозионно-активной среды;
- для большинства исследованных материалов определено, что СРТУ в коррозионно-активной среде крайне чувствительна к изменению ее параметров и параметров механического нагружения.

Список источников

1. ОСТ 1 92127–90. Металлы. Метод определения скорости роста усталостной трещины при испытаниях с постоянной амплитудой нагрузки. М.: ВИЛС, 1990. 68 с.
2. ASTM E647-15e1. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International, 2016. 49 p.

3. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
4. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 5. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
5. Абрамова М.Г. К вопросу о подтверждении идентичности механизма коррозионного разрушения алюминиевых сплавов (обзор). Часть 2. Коррозия в морской воде // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.06.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-95-103.
6. 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.
7. Каблов Е.Н., Кутырев А.Е., Вдовин А.И. и др. Исследование возможности возникновения контактной коррозии в паяных соединениях, используемых в конструкции двигателей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.06.2022). DOI 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
8. 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.
9. Гриневич А.В., Яковлев Н.О., Скрипачев С.Ю., Нужный Г.А. Коррозионное растрескивание сталей различной прочности в условиях постоянного раскрытия трещины // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 1. С. 43–48.
10. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Ерасов В.С., Нужный Г.А. Методика оценки вязкости разрушения в коррозионной среде при длительной статической нагрузке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 9. С. 52–56.
11. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Каримова С.А. Прочностные характеристики материалов планера самолетов в условиях влажности // Вопросы материаловедения. 2013. № 1 (73). С. 212–219.
12. 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.
13. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Причины зависимости механических характеристик трещиностойкости материала от размеров образца // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
14. Kang D.H., Lee J.K., Kim T.W. Corrosion fatigue crack propagation of high-strength steel HSB800 in a seawater environment // Procedia Engineering. 2010. P. 1170–1175. DOI: 0.1016/j.proeng.2011.04.195.
15. Arunachalam S., Fawaz S. Test method for corrosion pit-to-fatigue crack transition from a corner of hole in 7075-T651 aluminum alloy // International Journal of Fatigue. 2016. No. 98. P. 50–58.
16. Bogar F.D., Crooker T.W. Effects of Natural Seawater and Electrochemical Potential on Fatigue-Crack Growth in 5086 and 5456 Aluminum Alloys: NRL Report 8153. Washington, DC: Department of Defense, Navy Department, Office of Naval Research, Naval Research Laboratory, 1977. 14 p.
17. Vosikovskiy O. Effects of Mechanical and Environmental Variables on Fatigue Crack Growth Rates in Steel. A Summary of Work Done At CANMET // Canadian Metallurgical Quarterly. 1980. Vol. 19. P. 87–97.
18. Guo Y., Shao Y., Gao X. et al. Corrosion fatigue crack growth of serviced API 5L X56 submarine pipeline // Ocean Engineering. 2022. No. 256. Art. 111502.

19. Лаптев А.Б., Закирова Л.И., Загорских О.А., Павлов М.Р. Методы исследования процессов коррозионно-механического разрушения и наводороживания металлов (обзор). Часть 1. Исследование коррозионно-механического разрушения сталей // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-04-118-130.
20. A kind of difference seawater velocity Corrosion Fatigue Crack Propagation rate prediction method: pat. CN 110489848 A; filed 12.08.19; publ. 11.12.20.
21. Способ оценки сопротивления коррозионной усталости сварных соединений: пат. 2485483 Рос. Федерация. № 2012100593/28; заявл. 10.01.12; опубл. 20.06.13.
22. Device for corrosion and fatigue test: pat. ES 2393491 B1; filed 29.04.11; publ. 29.10.13.
23. Large-scale model corrosion fatigue test system and method for ocean engineering structure: pat. CN 112924369 A; filed 27.01.21; publ. 08.06.21.
24. A kind of steel bridge deck corrosion fatigue coupling test method and device thereof: pat. CN 110361318 A; filed 04.06.19; publ. 01.09.20.
25. Apparatus for testing corrosion fatigue life of automotive chassis parts: pat. KR 20080103124; filed. 23.05.07; publ. 27.11.08.
26. Barsom J.M. Effects of Cyclic Stress Form on Corrosion Fatigue Crack Propagation Below K_{Isc} in a High Yield Strength Steel // Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure. 1972. P. 424–433.
27. Selines R.J., Pelloux R.M. Effect of Cyclic Stress Wave Form on Corrosion Fatigue Crack Propagation in Al–Zn–Mg Alloys // Metallurgical Transactions. 1972. Vol. 3. P. 2525–2531.
28. Dawson D.B., Pelloux R.M. Corrosion Fatigue Crack Growth in Titanium Alloys in Aqueous Environments // Metallurgical Transactions. 1974. Vol. 5. P. 723–731.
29. Menan F., Henaff G. Influence of frequency and waveform on corrosion fatigue crack propagation in the 2024–1351 aluminium alloy in the S–L orientation // Materials Science and Engineering. 2009. P. 70–76. DOI: 10.1016/j.msea.2009.04.058.
30. Andersson C., Liu J. Effect of corrosion on the low cycle fatigue behavior of Sn–4.0 Ag–0.5 Cu lead-free solder joints // International Journal of Fatigue. 2008. Vol. 30 (5). P. 917–930. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.06.009.
31. Mukahiwa K., Scenini F., Burke M.G. et al. Corrosion fatigue and microstructural characterization of Type 316 austenitic stainless steels tested in PWR primary water // Corrosion Science. 2017. P. 57–70. DOI: 10.1016/j.corsci.2017.10.022.
32. Karpenko O., Oterkus S., Oterkus E. Titanium alloy corrosion fatigue crack growth rates prediction: Peridynamics based numerical approach // International Journal of Fatigue. 2022. No. 162. Art. 107023.
33. Liao X., Li Y., Qiang B. et al. An improved crack growth model of corrosion fatigue for steel in artificial seawater // International Journal of Fatigue. 2022. No. 160. Art. 106882.

References

1. Industry Standard 1 92127–90. *Metals. Method for determining the growth rate of a fatigue crack during tests with a constant load amplitude*. Moscow: VILS, 1990. 66 p.
2. ASTM E647-15e1. *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. ASTM International, 2016, 49 p.
3. Kablov E.N. *The role of fundamental research in the creation of new generation materials. Report of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
4. Lutsenko A.N., Slavin A.V., Erasov V.S., Khvackij K.K. Strength tests and researches of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
5. Abramova M.G. Revisiting the confirmation of the identity of the corrosion destruction mechanism of aluminum alloys (review). Part 2. Corrosion in sea water. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62). paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 21, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-95-103.

6. 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.
7. Kablov E.N., Kuttyrev A.E., Vdovin A.I., Kozlov I.A., Afanasyev-Khodykin A.N. The research of possibility of galvanic corrosion in brazed connections used in aviation engine construction. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 21, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-3-13.
8. 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.
9. Grinevich A.V., Yakovlev N.O., Skripachev S.Yu., Nuzhny G.A. Corrosion cracking of steels of various strengths under conditions of constant crack opening. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, 2019, no. 1, pp. 43–48.
10. Grinevich A.V., Lutsenko A.N., Erasov V.S., Nuzhny G.A. A technique for assessing fracture toughness in a corrosive environment under long-term static load. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, no. 9, pp. 52–56.
11. Lutsenko A.N., Grinevich A.V., Karimova S.A. Strength characteristics of aircraft airframe materials under humid conditions. *Voprosy materialovedeniya*, 2013, no. 1 (73), pp. 212–219.
12. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
13. Erasov V.S., Oreshko E.I. Reasons for dependence of mechanical characteristics of material fracture resistance on sample sizes. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
14. Kang D.H., Lee J.K., Kim T.W. Corrosion fatigue crack propagation of high-strength steel HSB800 in a seawater environment. *Procedia Engineering*, 2010, pp. 1170–1175. DOI: 0.1016/j.proeng.2011.04.195.
15. Arunachalam S., Fawaz S. Test method for corrosion pit-to-fatigue crack transition from a corner of hole in 7075-T651 aluminum alloy. *International Journal of Fatigue*, 2016, no. 98, pp. 50–58.
16. Bogar F.D., Crooker T.W. *Effects of Natural Seawater and Electrochemical Potential on Fatigue-Crack Growth in 5086 and 5456 Aluminum Alloys*: NRL Report 8153. Washington, DC: Department of Defense, Navy Department, Office of Naval Research, Naval Research Laboratory, 1977, 14 p.
17. Vosikovskiy O. Effects of Mechanical and Environmental Variables on Fatigue Crack Growth Rates in Steel. A Summary of Work Done At CANMET. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1980, vol. 19, pp. 87–97.
18. Guo Y., Shao Y., Gao X. et al. Corrosion fatigue crack growth of serviced API 5L X56 submarine pipeline. *Ocean Engineering*, 2022, no. 256, art. 111502.
19. Laptev A.B., Zakirova L.I., Zagorskikh O.A., Pavlov M.R. Methods of investigation of the processes of corrosion-mechanical destruction and hydrogenation of metals (review). Part 1. Investigation of corrosion-mechanical destruction of steels. *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 21, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-118-130.
20. *A kind of difference seawater velocity Corrosion Fatigue Crack Propagation rate prediction method*: pat. CN 110489848 A; filed 12.08.19; publ. 11.12.20.
21. *Method for assessing the corrosion fatigue resistance of welded joints*: pat. 2485483 Rus. Federation; filed 10.01.12; publ. 20.06.13.
22. *Device for corrosion and fatigue test*: pat. ES 2393491 B1; filed 29.04.11; publ. 29.10.13.
23. *Large-scale model corrosion fatigue test system and method for ocean engineering structure*: pat. CN 112924369 A; filed 27.01.21; publ. 08.06.21.
24. *A kind of steel bridge deck corrosion fatigue coupling test method and device thereof*: pat. CN 110361318 A; filed 04.06.19; publ. 01.09.20.

25. *Apparatus for testing corrosion fatigue life of automotive chassis parts*: pat. KR 20080103124; filed. 23.05.07; publ. 27.11.08.
26. Barsom J.M. Effects of Cyclic Stress Form on Corrosion Fatigue Crack Propagation Below KI_{sc} in a High Yield Strength Steel. *Corrosion Fatigue: Chemistry, Mechanics and Microstructure*, 1972, pp. 424–433.
27. Selines R.J., Pelloux R.M. Effect of Cyclic Stress Wave Form on Corrosion Fatigue Crack Propagation in Al–Zn–Mg Alloys. *Metallurgical Transactions*, 1972, vol. 3, pp. 2525–2531.
28. Dawson D.B., Pelloux R.M. Corrosion Fatigue Crack Growth in Titanium Alloys in Aqueous Environments. *Metallurgical Transactions*, 1974, vol. 5, pp. 723–731.
29. Menan F., Henaff G. Influence of frequency and waveform on corrosion fatigue crack propagation in the 2024–1351 aluminium alloy in the S–L orientation. *Materials Science and Engineering*, 2009, pp. 70–76. DOI: 10.1016/j.msea.2009.04.058.
30. Andersson C., Liu J. Effect of corrosion on the low cycle fatigue behavior of Sn–4.0 Ag–0.5 Cu lead-free solder joints. *International Journal of Fatigue*, 2008, vol. 30 (5), pp. 917–930. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2007.06.009.
31. Mukahiwa K., Scenini F., Burke M.G. et al. Corrosion fatigue and microstructural characterization of Type 316 austenitic stainless steels tested in PWR primary water. *Corrosion Science*, 2017, pp. 57–70. DOI: 10.1016/j.corsci.2017.10.022.
32. Karpenko O., Oterkus S., Oterkus E. Titanium alloy corrosion fatigue crack growth rates prediction: Peridynamics based numerical approach. *International Journal of Fatigue*, 2022, no. 162, art. 107023.
33. Liao X., Li Y., Qiang B. et al. An improved crack growth model of corrosion fatigue for steel in artificial seawater. *International Journal of Fatigue*, 2022, no. 160, art. 106882.

Информация об авторах

Горбовец Михаил Александрович, начальник Испытательного центра, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Ходинев Иван Александрович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Монин Сергей Алексеевич, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Mikhail A. Gorbovets, Head of Testing Center, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Sergey A. Monin, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 02.08.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 12.08.2022.
The article was submitted 02.08.2022; approved and accepted for publication after reviewing 12.08.2022.