

УДК 620.193

М.Г. Абрамова¹

**К ВОПРОСУ О ПОДТВЕРЖДЕНИИ ИДЕНТИЧНОСТИ
МЕХАНИЗМА КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (обзор)
Часть 1. Атмосферная коррозия**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-86-94

Представлен обзор ускоренных методов коррозионных исследований алюминиевых сплавов, при которых механизм разрушения идентичен коррозии в естественных условиях. В качестве критериев идентичности рассмотрены такие показатели, как кинетика развития процессов коррозии, соответствие видов коррозионных повреждений, морфология поверхности, особенности излома образцов, а также состав продуктов коррозии.

Ключевые слова: механизм коррозии, коррозия, натурные климатические испытания, натурно-ускоренные испытания, ускоренные лабораторные испытания, алюминиевые сплавы.

M.G. Abramova¹

**REVISITING THE CONFIRMATION OF THE IDENTITY
OF THE CORROSION DESTRUCTION MECHANISM
OF ALUMINUM ALLOYS (review)
Part 1. Atmospheric corrosion**

The paper presents a review of accelerated methods of corrosion research of aluminum alloys; the destruction mechanism in these methods is similar with that one in corrosion in natural conditions. The kinetics of the development of corrosion processes, the correspondence of absolute values of corrosion damage, their types and degree of development, the nature of corrosion damage and surface morphology, the nature of the fracture, and the analysis of the composition of corrosion products are considered as criteria of identity.

Keywords: corrosion mechanism, corrosion, full-scale climatic tests, full-scale accelerated tests, accelerated laboratory tests, aluminum alloys.

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

Одним из основных направлений развития методов коррозионных испытаний является разработка методик ускоренных и натурно-ускоренных испытаний с целью получения в сжатые сроки достоверных сведений о поведении материала в реальных климатических условиях, что, в свою очередь, обусловлено необходимостью своевременной разработки и внедрения новых материалов с улучшенными свойствами [1–6]. Отсутствие корреляции современных стандартизованных лабораторных методов исследования (среди которых наиболее распространенными являются испытания в камере солевого тумана) с результатами натурной экспозиции [7–11] обуславливает необходимость разработки новых методов коррозионных испытаний, позволяющих с высокой степенью достоверности по-

лучать прогнозные значения стойкости материалов в реальных климатических условиях [12, 13]. При сопоставлении результатов коррозионных исследований металлических материалов с целью оценки их соответствия и определения степени корреляции ключевым является вопрос установления идентичности механизма коррозионного разрушения при испытаниях на стойкость к коррозии различными методами (например, натурными и лабораторными).

Теория электрохимического механизма коррозионного разрушения металлов в условиях открытой атмосферы является основой науки о коррозии и широко представлена в трудах многочисленных исследований школ Г.В. Акимова, Ю. Эванса, Г. Кеше, И.Л. Розенфельда и др. [14–18]. Согласно работам [19, 20], первопричиной коррозии металлов

является стремление их перехода в термодинамически устойчивое состояние путем самопроизвольного растворения и перехода в более стабильное окисленное состояние. Процесс электрохимического растворения металла представляет собой сложную последовательность катодных и анодных реакций. В частности, в источнике [21] представлен анализ многолетних исследований процессов формирования и роста коррозионного очага.

Однако на практике подтверждение соответствия механизма коррозионного разрушения возможно только путем оперирования величинами, характеризующими изменение свойств материала по результатам воздействия коррозионной среды. При этом важно не только количественное выражение скорости коррозионного процесса, но и определение характера коррозии [14]. Утверждение о сохранении идентичности механизма коррозии либо о его изменении [22] часто оставляет множество вопросов о методологии его определения.

До настоящего времени вопрос методологии подтверждения соответствия механизма коррозионного разрушения при испытаниях различными методами остается открытым и малоизученным. Тем не менее подтверждение механизма коррозионного разрушения является главным доказательством возможности применения вновь разработанных методов ускоренных и циклических коррозионных испытаний, основной целью которых является сокращение времени коррозионных испытаний и допустимость их использования для прогнозирования коррозионных потерь материала на длительный период экспозиции в условиях воздействия атмосферных факторов.

Целью данной работы является выбор критериев оценки соответствия механизмов коррозионного разрушения при различных видах испытаний, которые впоследствии могут быть использованы для подтверждения идентичности механизма коррозии при разработке новых методов ускоренных и циклических коррозионных испытаний в сравнении с натурной экспозицией.

Характер коррозии

Согласно работам [14, 19], под характером коррозии понимают такие ее виды (типы), как общая и местная коррозия и их разновидности.

Общей коррозии подвергаются равномерные корродирующие металлы, такие как углеродистая сталь. По характеру общую коррозию разделяют на равномерную, неравномерную и избирательную [19]. Основным параметром, характеризующим степень развития общей коррозии, является скорость

коррозии (потеря массы) или толщина прородированного слоя.

Местной (локальной) коррозии подвержены алюминиевые и магниевые сплавы, нержавеющие и высокопрочные стали, составляющие большую долю применения в качестве конструкционных материалов. Основными типами местной коррозии являются межкристаллитная, питтинговая, расслаивающая коррозия и коррозионное растрескивание. В случае локального характера коррозионных разрушений метод оценки потери массы является менее информативным и на первый план выходят параметры глубины и характера коррозионных поражений как факторы, в наибольшей степени оказывающие влияние на снижение прочностных свойств. При этом степень влияния различных параметров локальной коррозии вносит различный вклад в изменение прочностных свойств материала [23, 24].

Традиционно определяемыми параметрами коррозионной стойкости алюминиевых сплавов являются скорость коррозии (потери массы) [25], глубина межкристаллитной (МКК) [26] и питтинговой коррозии [25], склонность к расслаивающей коррозии (РСК) [27] и коррозионному растрескиванию [28], а также потери механических [29] и усталостных свойств [30–33].

Для исследования механизма коррозии алюминиевых сплавов наибольшую ценность представляют не абсолютные или относительные значения вышеперечисленных параметров, а сопутствующие им факторы коррозионного разрушения, контролируемые с помощью аналитических методов исследования.

Методы исследования механизма коррозионного разрушения

Инструментами установления механизма коррозионного разрушения могут являться такие современные методы, как оптическая, лазерная сканирующая, растровая и рентгеноспектральная микроскопия, а также металлографический анализ с компьютерной обработкой анализатором изображений [34–38].

Рассмотрим некоторые параметры коррозионного разрушения алюминиевых сплавов на предмет корректности оперирования ими с целью подтверждения соответствия механизма коррозионного разрушения материала при различных коррозионных испытаниях (при условии испытания образцов одного и того же сплава и полуфабриката).

Кинетика развития процессов коррозии

При рассмотрении кинетики развития процессов коррозии следует разделять скорости протекания общей коррозии, определяемой

параметром скорости коррозии (или потерями массы), и локальной – питтинговой и межкристаллитной. Среди параметров локальной коррозии менее информативно исследование динамики расслаивающей коррозии, так как ее характерной чертой является непрерывное распространение после зарождения.

Кинетику развития скорости коррозии можно разделить на две стадии – до достижения 100% площади коррозионных поражений и после поражения. В натуральных условиях воздействия климатических факторов на первой стадии высоко влияние метеопараметров атмосферы, способных вызывать повышение или снижение скорости коррозии металлических материалов, – главным образом продолжительностей воздействия осадков и увлаж-

нения поверхности, а также количества выпадающих хлоридов [39].

Так, в работах [40, 41] приведено сопоставление кинетики скорости коррозии образцов из алюминиевых сплавов восьми марок при проведении натуральных и натурно-ускоренных испытаний (рис. 1). Снижение скорости коррозии в период с 3-го по 6-й мес натурной экспозиции (рис. 1, а) выпадает на летний период, характеризующийся наименьшими значениями продолжительности увлажнения и скорости осаждения хлорид-ионов; в период с 6-го по 12-й мес экспозиции наблюдается резкий рост скорости коррозии, сопровождающийся увеличением продолжительности увлажнения в 5 раз и скорости осаждения хлорид-ионов (по методу «влажной свечи») в 37 раз по сравнению с предшествующим

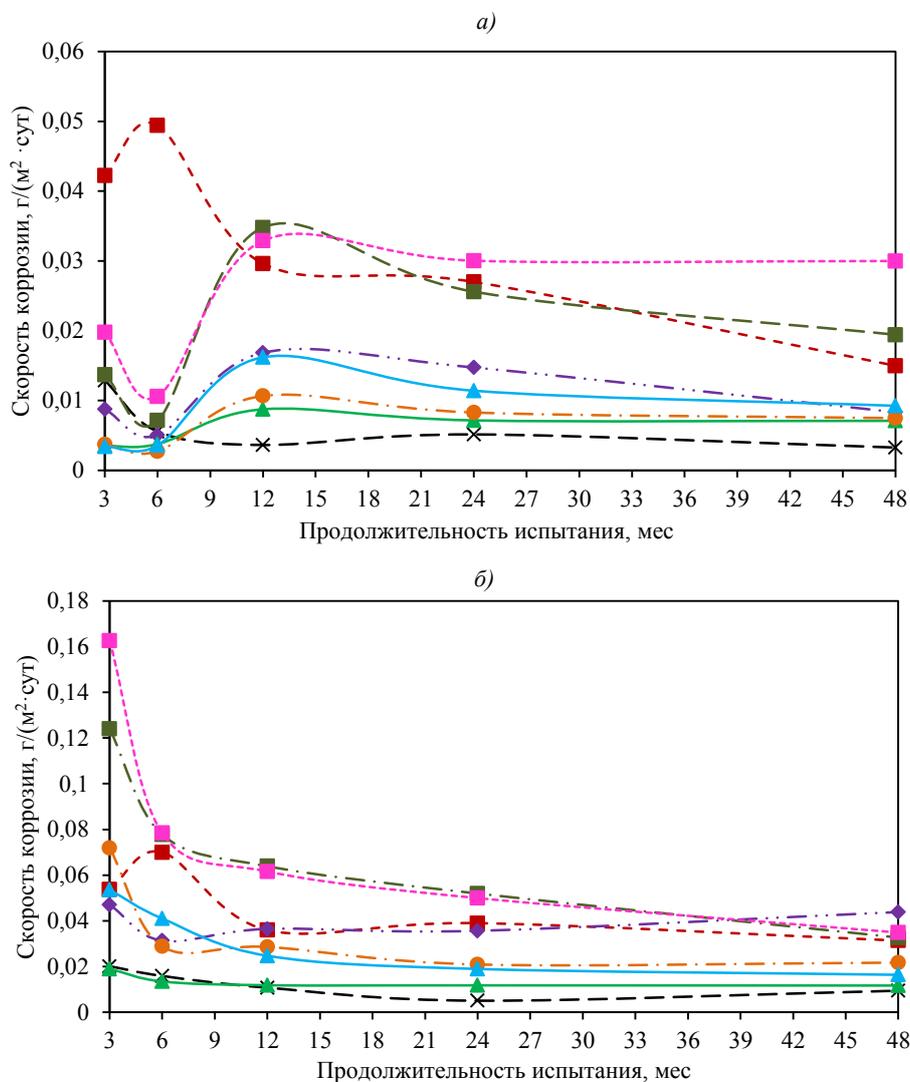


Рис. 1. Изменение скорости коррозии в процессе натуральных (а) и натурно-ускоренных испытаний (б) образцов из алюминиевых сплавов марок 1424-T1 (×), В-1341-T1 (▲), В96ЦЗп.ч.-Т12 (■), 1913-T3 (▲), 1441-T1 (◆), В-1461-T1 (■), В-1469-T1 (■), 1370-T1 (●) [40]

Метеопараметры атмосферы ГЦКИ за период экспозиции образцов из алюминиевых сплавов [41]

Период испытаний	Средняя температура воздуха, °С	Средняя относительная влажность воздуха, %	Суммарная продолжительность увлажнения поверхности, ч		Суммарное количество выпадения хлоридов на единицу площади, мг/(м ² ·сут), под навесом	
			в атмосфере	в жалюзийной будке	«сухое полотно»	«влажная свеча»
I (0–3 мес) апрель–июнь	16,9	84	623	1418	36,2	59,3
II (3–6 мес) июль–сентябрь	24,2	73	347	1232	22,4	38,0
III (6–12 мес) октябрь–март	5,5	76	1796	2891	231	1431
IV (1–2 года)	16,1	73	2019	3846	245	133
V (2–4 года)	15,2	72	5068	10405	1594	1862

периодом (см. таблицу). Достижение 100% площади пораженной поверхности образцов получено к 12 мес испытаний, после которых скорость коррозии не меняется или снижается незначительно.

При проведении натурно-ускоренных испытаний (рис. 1, б) влияние метеопараметров практически отсутствует (в данной работе испытания проводились под проветриваемым навесом при исключении влияния осадков) и скорость коррозии снижается уже после 3 мес испытаний, в течение которых площадь коррозионных поражений достигла 90–100% площади поверхности.

При лабораторных методах испытаний в условиях распыления солевого тумана скорость коррозии алюминиевых сплавов изменяется непрерывно в течение всего периода экспозиции независимо от образования продуктов коррозии [9, 42], что обусловлено постоянным наличием на поверхности образцов пленки влаги в сочетании с повышенной концентрацией хлорид-ионов. Непрерывное воздействие аэрозоля в камере солевого тумана (КСТ) исключает важную составляющую испытаний в натуральных условиях – периодическое высыхание поверхности, способствующее образованию более плотного слоя продуктов коррозии по сравнению с испытаниями в условиях постоянного воздействия влаги, способных тормозить коррозионный процесс. При натурно-ускоренных испытаниях нанесение аэрозолей осуществляют чаще всего однократно, при этом продолжительность воздействия электролита до высыхания поверхности (в зависимости от текущих метеоусловий) в зимние месяцы составляет 20–30 мин, а в летние – не более 5 мин. Таким образом, за исключением непродолжительного воздействия принудительно нанесенной

пленки электролита, при натурно-ускоренных испытаниях сохраняется та же последовательность воздействия комплекса метеорологических факторов, что и при натуральных испытаниях.

Различие кинетики коррозионного разрушения в течение первого года натуральных и натурно-ускоренных испытаний (рис. 1) напрямую связано с условиями экспозиции материалов ввиду высокой степени влияния осадков, отсутствующих при испытаниях под навесом. Экспозиция образцов материалов на открытой площадке, как показано в работе [43], обуславливает сохранение кинетики развития процессов коррозии при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях, при этом для последних характерна более высокая степень коррозионных повреждений.

Таким образом, чувствительность кинетики развития процессов коррозии к различиям условий коррозионных испытаний позволяет позиционировать данный фактор как один из инструментов исследования механизма коррозионного разрушения.

Установление соответствия абсолютных величин

коррозионных повреждений и их видов

Как показано в работах [7, 40], алюминиевые сплавы могут проявлять различную склонность к локальным видам коррозии – для сплавов различных систем может быть характерно как наличие, так и отсутствие склонности к разным видам коррозии (питтинговой, межкристаллитной, расслаивающей). В зависимости от вида коррозионных испытаний проявление склонности (либо преобладающей склонности) к различным видам локальной коррозии также может быть различным.

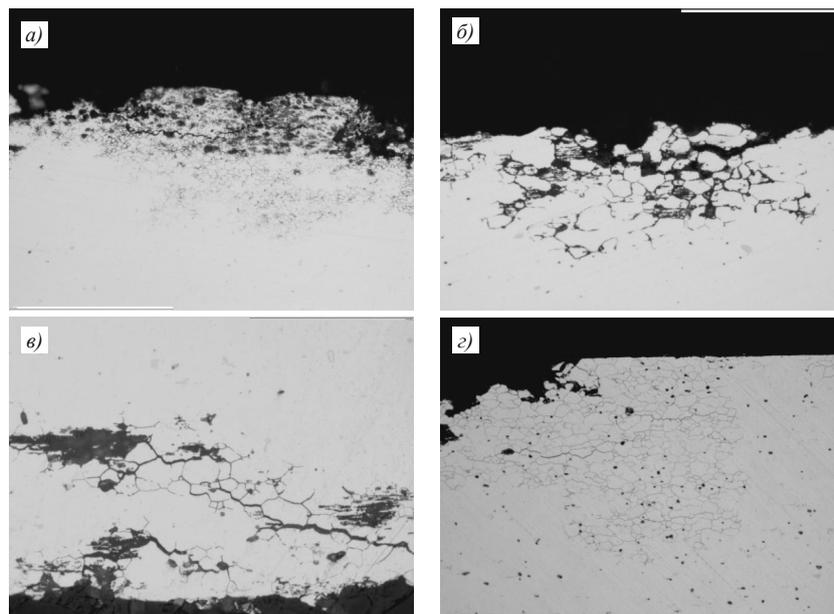


Рис. 2. Характерное распространение межкристаллитной коррозии для сплавов систем Al-Li (а), Al-Cu-Mg (б), Al-Zn-Mg-Cu (в) и Al-Mg-Si (г)

Так, согласно приведенным результатам исследований в работе [7], среди четырех исследованных алюминиевых сплавов, проявивших склонность к МКК по результатам испытаний в растворе по ГОСТ 9.021-74, для двух МКК не обнаружена после 3 мес испытаний в КСТ, а для сплава В-1469 – МКК не была выявлена и после 3 лет натурных испытаний, так как ввиду высокой коррозионной стойкости сплава для реализации процессов коррозии необходимы более длительные сроки натурной экспозиции либо проведение натурно-ускоренных испытаний. При испытаниях на склонность к РСК также выявлено несоответствие результатов лабораторных и натурных испытаний – среди всех четырех сплавов, проявивших склонность к РСК в растворе по ГОСТ 9.904-82 (от 3 до 6 балла в зависимости от сплава), ни один не проявил склонности к РСК в течение 3 мес экспозиции в КСТ. Наилучшее соответствие испытаниям в растворе показали результаты натурно-ускоренных испытаний за 2–2,5 года.

Помимо наличия склонности к тем или иным видам локальной коррозии для алюминиевых сплавов также является характерным наличие преобладающей (доминирующей) склонности к МКК, РСК и питтинговой коррозии [44]. Так, в работе [23] по результатам оценки коррозионной стойкости алюминиевых сплавов в течение 4 лет испытаний показано, что для сплавов различных систем установлена преобладающая склонность к межкристаллитной или питтинговой коррозии, что главным образом определяется физико-химическим составом

сплава, в котором наибольшее значение имеет процентное содержание меди и цинка.

При проведении сравнительных коррозионных испытаний различными методами, анализ результатов зачастую проводят путем сравнения получаемых данных для разных материалов относительно друг друга в зависимости от условий испытаний, а также путем ранжирования материалов по коррозионной стойкости. Так, в работе [10] были проведены ускоренные испытания кузовной стали с защитным покрытием по семи методикам европейских и американских автопроизводителей, в результате которых по трем методикам получено обратное ранжирование стойкости материалов по сравнению с остальными четырьмя. Сопоставление ранжирования стойкости материалов позволило выявить методы, обладающие наилучшим соответствием экспозиции в натурных условиях.

Характер коррозионного разрушения

Под характером коррозионного разрушения следует понимать вид, степень и структуру коррозионного поражения. Для исследования характера коррозионного разрушения применяют металлографический анализ микрошлифов образцов, подвергнутых коррозионным испытаниям, на металлографических микроскопах [45, 46].

В работе [24] приведен анализ характера распространения МКК алюминиевых сплавов в зависимости от системы легирования (рис. 2). Так, в зависимости от системы сплава различие характера коррозионного разрушения может быть установлено по следующим критериям:

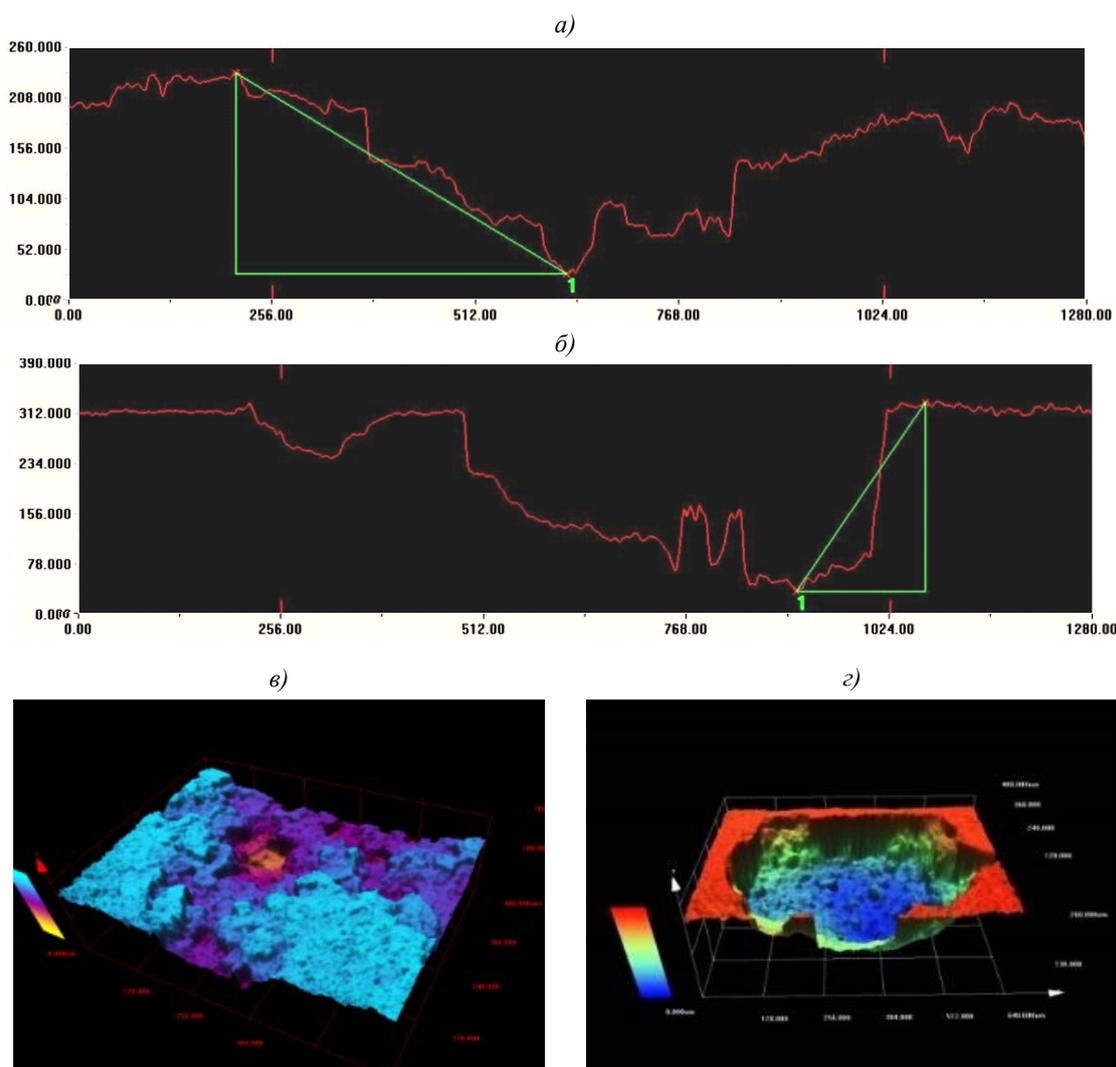


Рис. 3. Профиль (а, б) и 3D-изображение (в, г) участка поверхности образцов из сплава В96ЦЗп.ч.-Т12 после натурно-ускоренных испытаний (а, в) и после испытаний в КСТ (б, г)

– по преимущественному распространению очага МКК из питтинга или от поверхности образца;

– по степени изрезанности поверхности (наличию ярко выраженной питтинговой коррозии либо развитию в большей степени общей коррозии);

– по наличию растратов приповерхностных слоев (является характерным отличием для Al–Li сплавов);

– по размеру и форме ячеек сетки МКК, что определяется размерами зерна и наличием выделений по их границам, растворение которых становится следствием развития МКК.

Последний показатель является основным фактором, определяющим предрасположенность к активному развитию МКК вглубь металла, а также торможению роста МКК с течением времени.

Морфология поверхности при коррозионном воздействии

Проведение коррозионных испытаний натурными и ускоренными методами зачастую сопровождается отличием в характере профиля поверхности [37, 47]. Так, в работе [48] показано, что в то время как после натурно-ускоренных испытаний профиль поверхности имеет изрезанный конусообразный вид с плавными переходами, после испытаний в КСТ форма коррозионного очага приобретает «ножевой» характер со строго вертикальными стенками очага (рис. 3).

Состав продуктов коррозии (ПК)

Определение состава ПК возможно с применением методов масс-спектрометрического, хроматографического и рентгеноспектрального анализов, среди которых наиболее

информативным и часто применяемым является последний.

В работе [49] проведен анализ состава ПК алюминия при экспозиции на девяти станциях Саудовской Аравии в условиях чистой и промышленно загрязненной атмосферы. По результатам качественного анализа методом рентгеновской спектроскопии выявлено наличие либо отсутствие в составе продуктов коррозии соединений $H_4Al_2Si_2O_6$, Al_2O_3 , $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, SiO_2 , $CaCO_3$, $CaMg(CO_3)_2$, $NaAlSi_3O_8$, $NaCl$. Несмотря на различия в условиях испытаний в части аэрохимических параметров различных станций, выявить закономерности образования тех или иных продуктов коррозии в зависимости от условий экспозиции не удалось.

Сложность применения метода оценки соответствия состава ПК и его невысокая информативность определяются следующими факторами:

– высокой вариативностью получаемых результатов при анализе состава ПК алюминиевых сплавов, что объясняется зависимостью от фазового состава сплавов, характеризующегося высокой степенью гетерогенности, что, в свою очередь, вызывает неоднородность распределения по поверхности коррозионных очагов, вызванных растрескиванием различных фаз;

– высокой растворимостью некоторых соединений (в том числе наиболее часто встречаемых соединений хлора), что обуславливает сложность их идентификации вследствие смыва осадками;

– зависимостью состава ПК от внешних факторов, вносящих погрешности при идентификации и анализе получаемых результатов, – состава выносимых аэрозолей, пыли, деятельности микро- и макроорганизмов.

Характер излома при проведении механических испытаний или оценки результатов коррозионного растрескивания

Фрактографический анализ характера излома с применением растровой сканирующей микроскопии проводят главным образом с целью установления характера разрушения протестированных образцов при проведе-

нии механических и усталостных испытаний [38, 50], а также при анализе излома образцов, подвергнутых испытаниям на коррозионное растрескивание. Результаты анализа позволяют выявить источник зарождения трещины и определить первопричину разрушения – будь то механический долом или коррозионный очаг.

Проведенные в работе [50] исследования мест локализации деформации образцов из сплава 1441-T1 после испытаний на растяжение и циклическое нагружение в сравнении с образцами после коррозионных испытаний показали, что воздействие коррозионной среды приводит к уменьшению зон пластической деформации с развитием межзеренного хрупкого разрушения.

Критерии оценки соответствия механизма коррозионного разрушения

На основе рассмотренного ранее анализа можно выделить следующие критерии, позволяющие установить соответствие механизмов коррозионного разрушения алюминиевых сплавов при коррозионных испытаниях различными методами механизму коррозионного разрушения в естественных условиях:

– кинетика коррозионного разрушения;

– склонность к одним и тем же видам коррозионного разрушения с учетом доминирующего вида такого разрушения;

– коррозионное разрушение и морфология поверхности;

– ранжирование различных материалов при проведении сравнительных испытаний;

– характер разрушения, определяемый по результатам фрактографического анализа изломов.

Использование выбранных критериев при оценке соответствия механизма коррозионного разрушения позволит разрабатывать методы ускоренных коррозионных испытаний, получать данные по стойкости материалов к агрессивному воздействию внешних факторов без изменения механизма коррозионного разрушения в короткие сроки и прогнозировать изменение свойств алюминиевых сплавов в течение многих лет эксплуатации.

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. 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.
3. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Скрипачев С.Ю. Стандартизация климатической квалификации изделий // Стандарты и качество. 2016. №11. С. 82–85.

4. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №7. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.05.2019). DOI:10.18577/2307-6046-2014-0-7-10-10.
5. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
6. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
7. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Фомина М.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натурных испытаниях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №8 (44). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10.
8. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Киричок П.Ф., Фомина М.А. Ускоренные и циклические коррозионные испытания авиационных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №10 (82). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-61-75.
9. Стрекалов П.В., Панченко Ю.М., Жиликов В.П. и др. Ускоренные испытания сплава Д16 в соляном тумане. Масса удержанных хлоридов, коррозия, механические свойства // Коррозия: материалы, защита. 2007. №10. С. 1–8.
10. LeBozec N., Blandin N., Thierry D. Accelerated corrosion tests in the automotive industry: A comparison of the performance towards cosmetic corrosion // Materials and Corrosion. 2008. Vol. 59. No. 11. P. 889–894.
11. Blanc C., Mankowsky G. Susceptibility to pitting corrosion of 6056 aluminium alloy // Corrosion science. 1997. Vol. 39. No. 5. P. 949–959.
12. 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.
13. 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.
14. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1945. 361 с.
15. Evans U.R. The corrosion and oxidation of metals. London: Edward Arnold Ltd., 1960. 324 p.
16. Кеше Г. Коррозия металлов. Физико-химические принципы и актуальные проблемы. М.: Металлургия, 1984. С. 50–76.
17. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Металлургия, 1969. 448 с.
18. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1986. 368 с.
19. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976. 472 с.
20. Томашов Н.Д., Чернова Г.П. Пассивность и защита металлов от коррозии. М.: Наука, 1965. С. 12–17.
21. Soltis J. Passivity breakdown, pit initiation and propagation of pits in metallic materials // Corrosion Science. 2015. No. 90. P. 5–22.
22. Гриневич А.В., Нужный Г.А., Гулина И.В. Поиск критерия коррозионной повреждаемости // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 29–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-29-33.
23. Курс М.Г., Гончаров А.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 2. Питтинговая коррозия // Вопросы материаловедения. 2019. №1 (97). С. 175–187.
24. Абрамова М.Г., Гончаров А.А. Межкristаллитная коррозия деформируемых алюминиевых сплавов при натурных и натурно-ускоренных климатических испытаниях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №11 (83). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.11.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-85-94.
25. ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М.: Изд-во стандартов, 1999. 34 с.
26. ГОСТ 9.021–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкristаллитную коррозию. М.: Стандартинформ, 1974. 4 с.
27. ГОСТ 9.904–82. Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию. М.: Изд-во стандартов, 1983. 10 с.
28. ГОСТ 9.019–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые и магниевые. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание. М.: Изд-во стандартов, 1982. 17 с.
29. ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Изд-во стандартов, 1984. 49 с.
30. ГОСТ 25.502–79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1981. 64 с.

31. Семенов А.М., Синявский В.С., Калинин В.Д. Коррозионная стойкость алюминий-литиевых сплавов в различных климатических условиях // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2014. Т. 50. №2. С. 211.
32. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость листов сплава Д16ч.-Т в морских субтропиках // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-11-11.
33. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость образцов сплава 1201 в морских субтропиках // Коррозия: материалы, защита. 2015. №3. С. 1–5.
34. Каблов Е.Н., Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Жегина И.П., Фомина М.А. Исследование влияния коррозионной среды на процесс накопления повреждений и характер разрушения конструкционных алюминиевых сплавов 1441 и В-1469 при испытаниях на растяжение и малоцикловую усталость // Материаловедение. 2017. №1. С. 41–48.
35. Laptev A., Kurs M., Lonskaya N., Davydov D., Averina A. Investigation of corrosion damage of hydration aluminium alloys at full-scale accelerated tests // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7 (4). P. 5061–5066.
36. Жегина И.П., Григоренко В.Б., Морозова Л.В., Фомина М.А. Исследование изменения состояния поверхностных слоев алюминий-литиевых сплавов 1441 и В-1469 при комплексном воздействии напряжений и коррозионно-активной среды // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 65–69. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-65-69.
37. Исходжанова И.В., Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Лаптева М.А. Применение метода конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для исследования коррозионных повреждений // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №4. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-11-11.
38. Быщенко О.А., Григоренко В.Б., Лукина Е.А., Морозова Л.В. Развитие методов металлофизических исследований: методологические вопросы и практическая значимость // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 498–515. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-498-515.
39. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Авдеев Ю.П. и др. Стандарты для натуральных климатических испытательных материалов на климатических станциях // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. №2. С. 2–5.
40. 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.
41. Курс М.Г. Метод расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения листов из деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ, 2016. 147 с.
42. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 18–22.
43. Абрамова М.Г. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов при испытаниях на станциях континентального и морского типа // Авиационные материалы и технологии. 2020. №3 (60). С. 57–65. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-57-65.
44. Knight S.P., Salsgaras M., Trueman A.R. The study of intergranular corrosion in aircraft aluminum alloys using X-ray tomography // Corrosion science. 2011. No. 53. P. 727–734.
45. Roberge P.R., Trethewey K.R. The fractal dimension of corroded aluminium surfaces // Journal of Applied Electrochemistry. 1995. Vol. 25. Is. 10. P. 962–966.
46. Horvath V.K., Herrmann H.J. The fractal dimension of corrosion cracks // Chaos, Solitons & Fractals. 1991. No. 5. P. 395–400.
47. Морозова Л.В., Исходжанова И.В. Исследование закономерностей изменения рельефа поверхности образцов из алюминий-литиевых сплавов методом лазерной микроскопии // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №10. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-8-8.
48. Курс М.Г., Фомина М.А. Исследование закономерностей коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натуральных испытаниях // Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов: сб. докл. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 21.
49. Syed S. Influence of the environment on atmospheric corrosion of aluminium // Corrosion Engineering Science and Technology. Taylor & Francis, 2010. P. 282–287. DOI: 10.1179/147842208x373182.
50. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.