

УДК 669.715:620.193

М.Г. Курс¹**АТМОСФЕРНАЯ КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПЕРСПЕКТИВНЫХ Al-Li СПЛАВОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ НАТУРНО-УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО ТЕПЛОГО КЛИМАТА**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-88-94

В настоящее время становится актуальным вопрос получения в короткие сроки достоверной оценки коррозионной стойкости материалов при испытаниях в жестких климатических условиях. Предлагаемый метод натурно-ускоренных испытаний позволяет в 4–5 раз быстрее получить данные о коррозионной стойкости материала по сравнению с испытаниями в открытой атмосфере.

Приведены результаты исследования коррозионной стойкости листов из перспективных алюминий-литиевых сплавов 1441-T1, 1424-T1, V-1461-T1 и V-1469-T1 при испытаниях натурно-ускоренным методом. В основе метода лежит ускорение коррозионного процесса путем периодического нанесения раствора морской соли на поверхность образца, экспонирующегося на атмосферном стенде климатической станции Геленджикского центра климатических испытаний имени Г.В. Акимова (ГЦКИ ВИАМ).

Показано, что за 12 мес испытаний достигнуты максимальные значения глубины межкристаллитной и питтинговой коррозии, которые далее изменяются незначительно. Рассмотрение скорости коррозии в динамике показало ее значительное снижение уже после 6 мес экспозиции.

Установлено, что наиболее высокой коррозионной стойкостью обладает сплав 1424-T1.

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

Ключевые слова: *коррозия, алюминий-литиевые сплавы, натурно-ускоренные испытания, показатели коррозионной стойкости.*

It is now becoming an essential matter to get a reliable assessment of corrosion resistance in a short time when tested in harsh climatic conditions. The proposed method of full-scale accelerated tests allows getting data about corrosion resistance of the material 4–5 times faster in comparison with the tests in the open atmosphere.

In the present paper the results of corrosion resistance research of plates made of perspective aluminum-lithium alloys 1441-T1, 1424-T1, V-1461-T1 and V-1469-T1 by full-scale accelerated tests are presented. The method is based on the acceleration of the corrosion process by periodically applying a sea salt solution on the surface of the sample exposed to atmospheric climate station stand of the Gelendzhik climatic testing center named after G.V. Akimov (GCTC of VIAM).

It was shown that during 12 months of testing the maximum values of intergranular and pitting corrosion depth are achieved which further changed slightly. The examination of corrosion rate in its dynamics showed its considerable decrease after 6 months of exposition.

It was found that 1424-T1 alloy has the highest corrosion resistance.

Work is executed within implementation of the complex scientific direction 18.2. «Development of methods of climatic tests and tool methods of research» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: *corrosion, aluminum-lithium alloys, full-scale accelerated tests, rates of corrosion resistance.*

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

Алюминиевые деформируемые сплавы остаются базовыми конструкционными материалами планера современной и перспективной авиационной техники (SSJ-100, Ту-204, Ил-76МД-90, Ан-148, Бе-200, А-380, В-777 и др.) благодаря легкости, комплексу необходимых эксплуатационных характеристик, хорошей технологичности,

а также в связи с тем, что технология изготовления алюминиевых сплавов уже освоена в металлургическом и авиационном производстве. Состав и структура алюминиевых сплавов, режимы и методы изготовления из них полуфабрикатов и деталей продолжают постоянно совершенствоваться и обновляться в соответствии с возрастающими требованиями к конструкциям (весовой

эффективности, ресурсу, живучести, надежности, летным характеристикам) [2–4].

Современная авиационная техника эксплуатируется, как правило, в различных климатических районах, в том числе с тропическим и морским климатом, и подвергается значительному коррозионному воздействию. Наиболее сильное коррозионное влияние на конструкции изделий оказывает морская атмосфера, в условиях которой оседающие на поверхность металлических деталей хлориды являются мощным стимулирующим фактором коррозии [5].

Проведение климатических испытаний и исследование коррозионной стойкости алюминиевых сплавов является, несомненно, важной задачей. Данные о коррозионной стойкости материала позволяют оценить возможное поведение материала при эксплуатации в составе конструкции.

Получение объективных данных о коррозионной стойкости материалов в жестких климатических условиях возможно только при проведении натуральных испытаний [6], единственным существенным недостатком которых является их значительная продолжительность.

В будущем более высокий уровень развития авиации смогут обеспечить только принципиально новые материалы и технологии, так как потенциал традиционных уже исчерпан и дальнейшее их использование дает незначительные результаты при существенных затратах [1]. При разработке новых материалов встает вопрос о необходимости разработки метода, позволяющего получать данные об атмосферной стойкости сплавов за более короткий срок по сравнению с натурными испытаниями.

В данной работе приведены результаты исследования коррозионной стойкости листов из алюминий-литиевых сплавов 1441-Т1, 1424-Т1, В-1461-Т1 и В-1469-Т1 при испытаниях натурно-ускоренным методом [7, 8]. Данный метод основан на инициации и ускорении коррозионного процесса путем повышения частоты образования пленки электролита на поверхности образца, находящегося на экспозиции на климатической станции в горизонтальном положении под навесом. Испытания под навесом являются более жесткими по сравнению с экспозицией на открытой площадке. (Эти выводы сделаны по результатам многолетних испытаний в ГЦКИ ВИАМ, а также приведены в работе [9].) Суммарная про-

должительность увлажнения поверхности образцов под навесом в среднем в 2 раза выше, чем на открытой площадке.

Метод позволяет получать характеристики атмосферной коррозионной стойкости алюминиевых сплавов в 4–5 раз быстрее по сравнению с традиционными испытаниями на открытой площадке без изменения механизма коррозионного разрушения. Первые очаги коррозии при испытаниях натурно-ускоренным методом появляются на 2–5 сут, в то время как для экспонирующихся на открытой площадке образцов – от 2 до 4 недель в зависимости от времени (сезона) выставления образцов. Площадь коррозионных поражений достигает 90% уже после 3 мес экспозиции.

При экспозиции в открытой атмосфере часто обнаруживается сезонная неэквивалентность скорости коррозионного процесса при выставлении образцов в разное время года, особенно на небольшие сроки [10]. При натурно-ускоренных испытаниях влияние перепадов атмосферного воздействия сведено к минимуму [8] ввиду принудительного нанесения пленки электролита, в значительной степени обуславливающей интенсивность коррозионного разрушения.

Материалы и методы

В области разработки и производства современных алюминий-литиевых сплавов нового поколения несомненным лидером является ВИАМ. Алюминий-литиевые сплавы, созданные на базе систем легирования Al–Mg–Li, Al–Cu–Li и Al–Cu–Mg–Li, характеризуются пониженной плотностью, повышенной жесткостью, являются альтернативой основным конструкционным алюминиевым сплавам 1163 и В95, превосходя их по прочностным и ресурсным характеристикам, свариваемости и коррозионной стойкости.

В результате совместной работы ВИАМ и Каменск-Уральского металлургического завода созданы алюминий-литиевые сплавы третьего поколения и технологии их обработки: сплавы средней прочности 1441 и 1424; высокопрочные сплавы В-1461 и В-1469. Сплавы 1424 и В-1461 дополнительно легированы цинком, сплав В-1469 – серебром [11].

Испытания проводили на образцах (пластинах), изготовленных из листов толщиной 1,6–2,4 мм (см. таблицу) с предварительно удаленной методом химического травления лакировкой.

Система легирования испытываемых полуфабрикатов из алюминиевых сплавов после термообработки (Т1)

Сплав	Толщина листа, мм	Система легирования
1424	1,6	Al–5Mg–1,5Li
1441	1,7	Al–Li–Mg–Si
В-1461	2,0	Al–2,8Cu–1,7Li–0,5Mg–0,5Zn
В-1469	2,4	Al–1,8Cu–Li

Сплавы пониженной плотности 1424 и В-1461 разработаны в качестве альтернативы сплавам 1163-Т и В950.ч.-Т2 соответственно [12].

Листы из сплава В-1469 толщиной 0,8–1,2 мм применены в качестве стопперов усталостных трещин (дублеров) в конструкции самолета МС-21 [11].

Листы толщиной >0,5 мм и профили из сплава 1441 использованы с весовой эффективностью ~10% в конструкции планера самолетов Бе-200, Бе-103. Благодаря высокому комплексу эксплуатационных характеристик на основе листов из сплава 1441 создан и осваивается оригинальный конкурентоспособный класс слоистых гибридных алюмокомпозитов 1441-СИАЛ [13].

Для проведения испытаний образцы алюминиевых сплавов были установлены на атмосферных стендах под навесом в ГЦКИ им. Г.В. Акимова. По климатическим признакам центр принадлежит к умеренно теплому климату с мягкой зимой (ГОСТ 16350). По ISO 9223 агрессивность атмосферы ГЦКИ классифицируется как С3 (средняя).

В качестве раствора электролита использован раствор морской соли концентрацией 5 г/л, полученный из морской воды методом выпаривания, наносимый на поверхность образцов с помощью пульверизатора 1 раз в сутки. Для сравнения результатов также были выставлены образцы без нанесения раствора морской соли.

Горизонтальное расположение образцов под навесом выбрано для увеличения продолжительности нахождения образцов под пленкой электролита. Испытания под навесом являются более коррозионно-агрессивными по сравнению с испытаниями на открытой площадке ввиду отсутствия прямого попадания солнечных лучей и большей продолжительности увлажнения поверхности.

Съем образцов и оценка коррозионных параметров проводились после 3, 6, 12 и 24 мес экспозиции согласно ГОСТ 9.905–82 [14]. После съема оценивали глубину питтинговой и

межкристаллитной коррозии, скорость коррозии, потери механических свойств.

Результаты

Исследование динамики изменения скорости коррозии

При испытаниях под навесом в свободном состоянии максимальные значения скорости коррозии были получены для сплавов В-1461-Т1 и 1441-Т1 после 12 мес экспозиции, для сплава В-1469-Т1 – после 6 мес испытаний, для сплава 1424-Т1 – после 3 мес (рис. 1, а). Для оценки скорости коррозии важно рассматривать данную характеристику в динамике. Благодаря этому можно проследить общую тенденцию коррозионного разрушения металла. Неравномерное развитие скорости коррозии образцов, экспонированных без облива, связано с воздействием параметров атмосферы, различное сезонное влияние которых описано в работе [8], при этом наибольшее влияние на динамику развития скорости коррозии оказывали продолжительность увлажнения поверхности и количество выпадающих хлоридов.

Для образцов, экспонированных с нанесением растворов морской соли, столь очевидного сезонного влияния метеопараметров не прослеживается. Максимальные значения скорости коррозии для сплава В-1469-Т1 получены после 6 мес испытаний, для остальных сплавов – после 3 мес (рис. 1, б).

На образцах, испытывавшихся с обливом, площадь коррозионных поражений после 3 мес испытаний достигала 95% от поверхности с образованием плотного слоя продуктов коррозии, что в дальнейшем препятствовало доступу кислорода к поверхности металла и, соответственно, тормозило развитие коррозионного процесса. Для образцов, испытывавшихся в свободном состоянии, после 12 мес испытаний площадь коррозионных пораже-

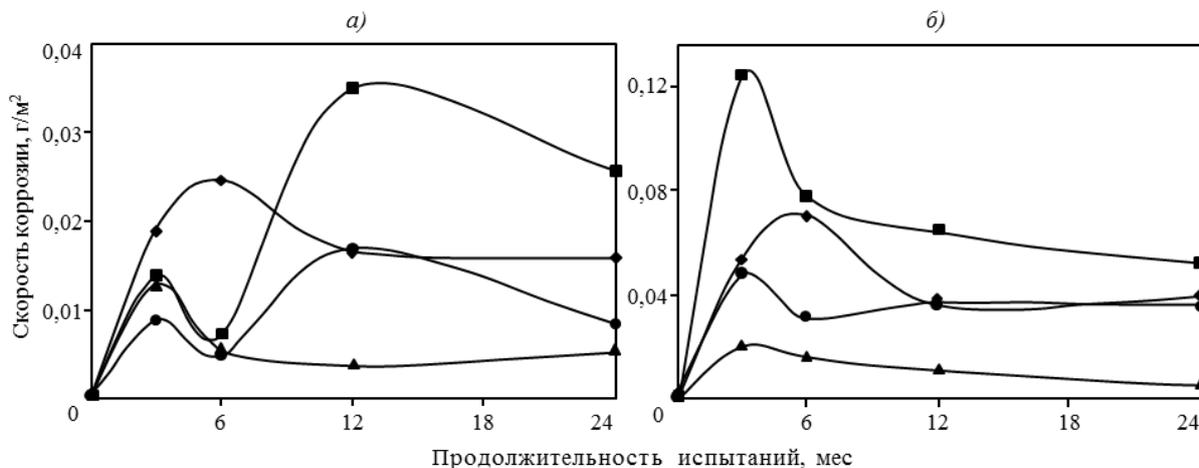


Рис. 1. Скорость коррозии образцов из алюминиевых сплавов 1424-Т1 (▲), В-1469-Т1 (◆), В-1461-Т1 (■) и 1441-Т1 (●) после 2 лет испытаний под навесом без облива (а) и с ежедневным обливом раствором морской соли (б)

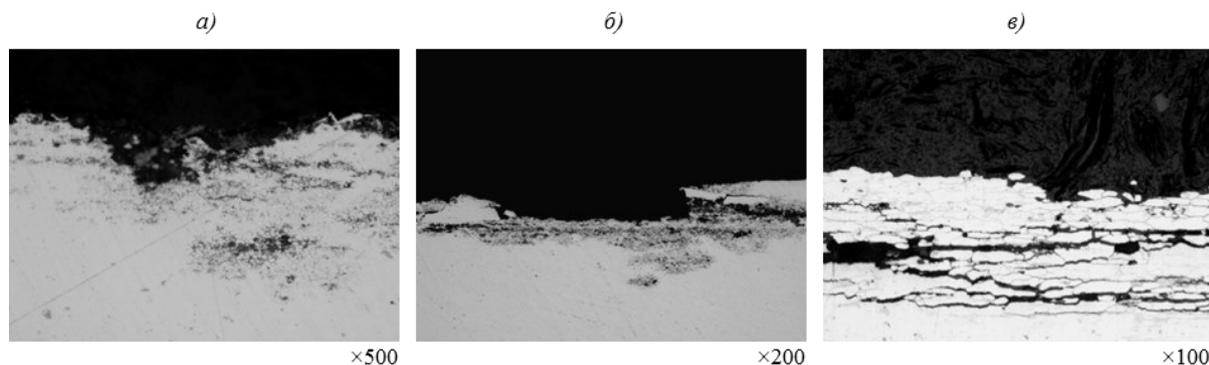


Рис. 2. Межкристаллитная коррозия алюминиевых сплавов В-1461-Т1 (а), В-1469-Т1 (б) и 1441-Т1 (в) после 2 лет натурно-ускоренных испытаний с нанесением раствора морской соли

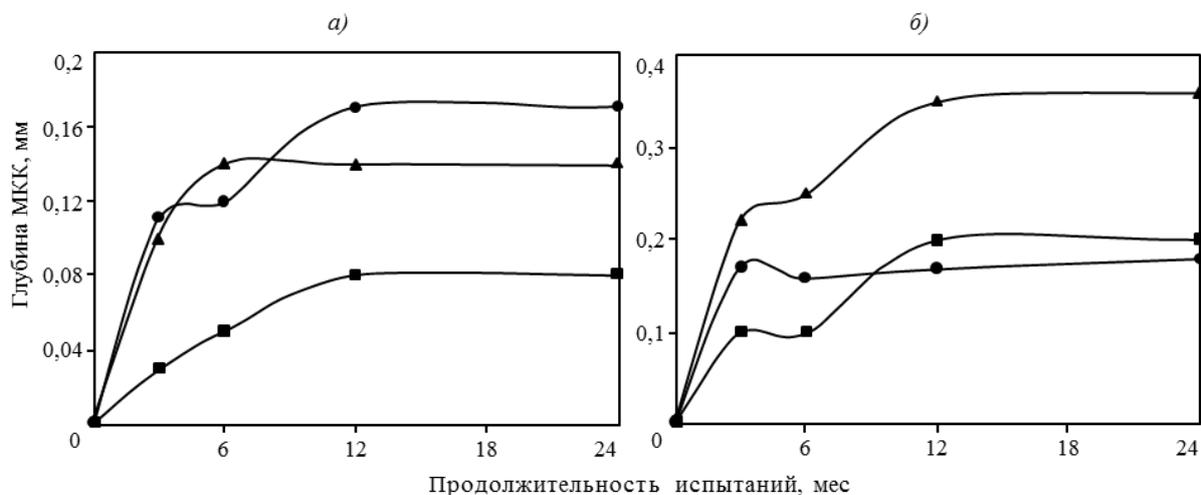


Рис. 3. Глубина межкристаллитной коррозии образцов из алюминиевых сплавов В-1469-Т1 (●), В-1461-Т1 (■) и 1441-Т1 (▲) после 2 лет испытаний под навесом без обливов (а) и с ежедневным обливом (б)

ний составляла ~50% от поверхности, соответственно сохранялся доступ коррозионной среды к поверхности металла, скорость коррозии продолжала расти [15].

Минимальные значения скорости коррозии получены для сплавов 1424-Т1 и 1441-Т1, максимальные – для В-1461-Т1. Для сплава 1424-Т1 характерны не только минимальные значения скорости коррозии, но и наиболее быстрое торможение скорости коррозии при испытаниях как с обливом, так и в свободном состоянии, что свидетельствует о высоком коррозионном сопротивлении сплава.

Межкристаллитная коррозия

Межкристаллитная коррозия (ММК) алюминиевых сплавов представляет опасность тем, что, невидимая невооруженным глазом, она может привести к преждевременному разрушению конструкции. Проведение ремонтных работ изделий авиационной техники усложняется ввиду того, что факт наличия межкристаллитной коррозии может быть установлен только по результатам металлографического анализа в лабораторных условиях на шлифах, изготовленных из детали, вырезанной из конструкции планера самолета [16]. В связи с этим при разработ-

ке алюминиевых сплавов испытаниям на склонность к ММК уделяется особое внимание.

Сплав 1424-Т1 не проявил склонности к межкристаллитной коррозии. Для сплава В-1461-Т1 было отмечено наличие в большей степени растратов приповерхностных слоев, чем межкристаллитной коррозии. Сетка ММК имеет очень мелкочаистую структуру и хорошо видна только при большом увеличении микроскопа (рис. 2, а).

Межкристаллитная коррозия сплава В-1469-Т1 имеет мелкочаистую сетку, распространяющуюся преимущественно в горизонтальном направлении практически по всему краю шлифа (рис. 2, б). Отмечается торможение роста ММК во времени.

Сплав 1441-Т1 характеризуется наибольшей глубиной ММК среди остальных сплавов, характер сетки – крупночаистая, распространение – в глубь образца, практически непрерывно по всему краю шлифа (рис. 2, в). На образцах из сплава 1441-Т1 зафиксирована расслаивающая коррозия 6-го балла.

Максимальные значения ММК для сплавов В-1469-Т1, 1441-Т1 и В-1461-Т1 были достигнуты после 12 мес испытаний и далее изменялись незначительно (рис. 3).

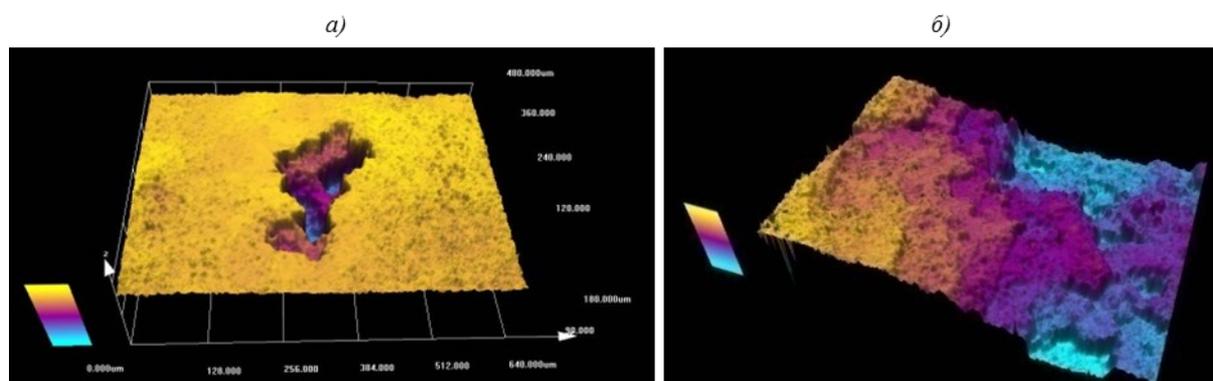


Рис. 4. Изображение (3D) рельефа участка поверхности образцов из сплавов 1424-T1 (а) и 1441-T1 (б) после 2 лет испытаний с ежедневным нанесением раствора морской соли

Условия испытаний повлияли не на скорость достижения максимальной величины МКК, а на ее глубину после определенного срока испытаний. Специфика развития МКК алюминиевых сплавов обуславливается индивидуальными особенностями фазового состава и величиной разности потенциалов по границам зерен. Наличие электролита в значительной мере способствует зарождению МКК и ее росту. Как видно из графиков, в то время как для сплава В-1469-T1 условия испытаний не повлияли на глубину МКК, для сплавов В-1461-T1 и 1441-T1 характерно увеличение глубины в 2 раза. Таким образом, натурно-ускоренные испытания позволяют оценить возможность развития МКК в конструкциях, эксплуатирующихся в жестких климатических условиях, когда существует риск проникновения электролита в место повреждения покрытия.

Оценка глубины питтинговой коррозии

Питтинговая коррозия алюминиевых сплавов может достигать высоких значений и в совокупности с межкристаллитной коррозией, которая развивается из питтингов, оказывать значительное влияние на изменение прочностных характеристик материала. Геометрические размеры питтинга, а также процент поражения им поверхности для каждого сплава разные (рис. 4) и зависят от фазового и структурного составов, от способа обработки поверхности и др. В то время как для сплава 1424-T1 питтинговая коррозия имеет более локальный характер (глубина ~80 мкм), для остальных сплавов характерно наличие питтингов большего сечения при большем проценте поражения поверхности (глубина ~130–150 мкм).

В работе [17] рассмотрен метод фрактального анализа, позволяющий достоверно оценивать наиболее опасные для коррозионностойких алюминиевых сплавов и сталей коррозионные поражения (питтинги, межкристаллитная и расслаивающая коррозия). Метод основан на количественном анализе образующихся коррозионных повреждений с помощью компьютерной обработки и

изучении микроструктуры шлифов исследуемого материала.

Оценка изменения прочностных характеристик

В результате многолетних испытаний алюминиевых сплавов в ГЦКИ выявлено, что на потери прочностных характеристик значительно влияет толщина листа. Так, для листов толщиной ~2 мм после 1–3 лет экспозиции на открытой площадке потери σ_b не превышают 10%, а для листов толщиной ~0,5 мм могут достигать 80%. Таким образом, достоверная оценка прочностных характеристик материала после коррозионных испытаний является сложной задачей.

В процессе климатических испытаний по ГОСТ 9.908–85 [18] снижение механических свойств является характеристикой коррозионного эффекта МКК. Однако, если толщина слоя материала, подвергшегося коррозионному воздействию, намного меньше общей толщины образца (в зависимости от глубины коррозионного поражения разница может достигать 5–10 раз), то получаемые значения потерь прочностных свойств не являются характеристикой, восприимчивой к изменению коррозионно-активного состояния материала [10]. С учетом погрешности измерения, в процессе испытаний потери прочностных свойств практически не изменяются. Так, для исследуемых сплавов потери прочности после двух лет натурно-ускоренных испытаний составили 3,5–8,5%, для сплава 1424-T1: 1,8%.

Характеристики пластичности, напротив, наиболее подвержены изменению в ходе коррозионных испытаний. Однако получение достоверных результатов зачастую усложняется ввиду большого разброса получаемых значений, что, в свою очередь, может быть обусловлено неравномерностью коррозионного поражения поверхности. В процессе испытаний при растяжении место разрыва не всегда происходит в наиболее коррозионно-поврежденном участке, что сказывается на результатах испытаний (рис. 5). Так, для спла-

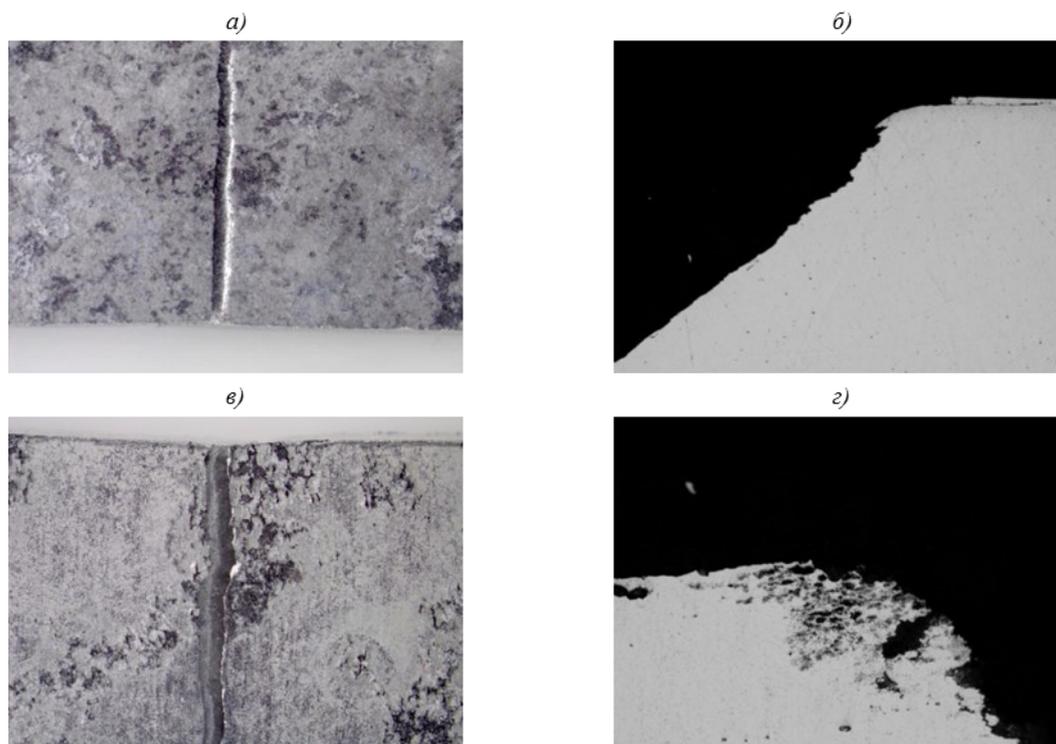


Рис. 5. Рабочая часть образцов из сплавов 1441-T1 (а, б) и В-1461-T1 (в, г) в месте разрыва после испытания при растяжении: а, в – внешний вид; б, г – микроструктура ($\times 100$)

ва 1441-T1 были получены меньшие значения потерь прочностных свойств при больших значениях глубины МКК и питтинговой коррозии.

Как видно из рис. 5, а, б, разрыв материала при испытании при растяжении произошел не через коррозионный очаг, МКК на шлифе отсутствует. Для сплава В-1461-T1 разрыв материала произошел в месте коррозионного очага, на микроструктуре шлифа можно увидеть очаги межкристаллитной коррозии (рис. 5, в, г).

Авторами работ [10, 17, 19] предлагается метод измерения микротвердости поверхности как способ оценки изменения состояния поверхности в процессе коррозионных испытаний. Данный метод чувствителен к изменению коррозионного состояния материала, обладает достаточной точностью и достоверностью результатов, так как измерения проводятся в пределах глубины коррозионного поражения материала. Метод позволяет в автоматическом режиме получать необходимое количество данных на сравнительно небольшом участке поверхности.

Обсуждение и заключения

По результатам испытаний можно сделать вывод о том, что при экспозиции образцов из алюминиевого сплава с нанесением раствора морской соли максимальное развитие коррозионного процесса происходит в течение первого года и далее изменяется незначительно. Таким образом, за 12 мес натурно-ускоренных испытаний можно получить данные, в полной мере характеризующие коррозионное поведение материала в жест-

ких климатических условиях.

По результатам испытаний установлено, что к наиболее чувствительным характеристикам коррозионно-активного состояния материала можно отнести скорость коррозии, а также глубину межкристаллитной и питтинговой коррозии. Для получения достоверных данных о климатической стойкости материала необходимо рассматривать изменение коррозионных характеристик в динамике. Определение потерь механических свойств при испытаниях при растяжении носит, скорее, информативный характер и не является методом достоверной оценки деградации коррозионного состояния материала в процессе испытаний.

Алюминий-литиевые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, быстрым затуханием скорости коррозии, удовлетворительными значениями межкристаллитной и питтинговой коррозии. Среди испытываемых сплавов можно выделить сплав 1424-T1 как наиболее коррозионностойкий. Испытания продолжаются.

Благодарность

Автор выражает благодарность сотрудникам ГЦКИ им. Г.В. Акимова И.Ю. Брух, А.А. Гончарову, А.В. Гладких, И.С. Курс, З.И. Буйновой, Е.Ю. Ветровой, В.Н. Конкиной за помощь в проведении испытаний.

Работа выполнена в рамках проекта RFMEFIFFF14X0004 «Комплексное развитие инфраструктуры ЦКП «Климатический центр коллективного пользования ФГУП «ВИАМ».

ЛИТЕРАТУРА

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.
2. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 167–182.
3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №12. С. 6–18.
4. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // *Наука и жизнь*. 2012. №11. С. 16–21.
5. Каримова С.А., Жиликов В.П., Михайлов А.А., Чесноков Д.В., Игонин Т.Н., Карпов В.А. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов в условиях воздействия морской атмосферы // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. №10. С. 1–3.
6. Карпов В.А., Михайлова О.Л., Руднев В.П. О сопоставлении результатов ускоренных и натуральных испытаний защитных смазочных материалов // *Коррозия: материалы, защита*. 2004. №6. С. 45–47.
7. ММ1.595-591-444–2012. Проведение климатических испытаний образцов и элементов конструкций с обливом морской водой или растворами морской соли.
8. Курс М.Г., Каримова С.А. Натурно-ускоренные испытания: особенности методики и способы оценки коррозионных характеристик алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 51–57.
9. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость листов сплава Д16ч.-Г в морских субтропиках // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.02.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-11-11.
10. Медведев И.М., Старцев О.В. Исследование сезонной неэквивалентности коррозионной агрессивности атмосферы с использованием микромеханических свойств стали Ст3 // *Коррозия: материалы, защита*. 2014. №5. С. 1–4.
11. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 183–195.
12. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминийлитиевые сплавы для самолетостроения // *Металлург*. 2012. №5. С. 31–35.
13. Антипов В.В. Технологичный алюминийлитиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе // *Металлург*. 2012. №5. С. 36–39.
14. ГОСТ 9.905–82. Методы коррозионных испытаний. Общие требования.
15. Курс М.Г., Каримова С.А., Махсидов В.В. Сравнение коррозионной стойкости деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных климатических испытаниях // *Вопросы материаловедения*. 2013. №1 (73). С. 182–190.
16. Фомина М.А., Каримова С.А. Анализ коррозионного состояния материалов планера самолетов типа «Су» после длительных сроков эксплуатации // *Коррозия: материалы, защита*. 2014. №9. С. 20–24.
17. Старцев О.В., Медведев И.М., Поляков В.В., Беляев И.А. Оценка коррозионных поражений алюминиевого сплава методами фрактального анализа и микротвердости // *Коррозия: материалы, защита*. 2014. №6. С. 43–48.
18. ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М., 1985.
19. Старцев О.В., Медведев И.М., Курс М.Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №3. С. 16–19.