

УДК 620.193:669.715

М.Г. Абрамова¹, А.А. Гончаров¹**МЕЖКРИСТАЛЛИТНАЯ КОРРОЗИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ НАТУРНЫХ
И НАТУРНО-УСКОРЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-85-94

Рассмотрены основные закономерности развития межкристаллитной коррозии (МКК) алюминиевых сплавов после натурных и натурно-ускоренных испытаний в условиях умеренно теплого климата приморской зоны в зависимости от системы легирования. Показано влияние геометрических размеров зерна сплавов различных систем на глубину МКК. Установлены зависимости потерь механических свойств при растяжении от глубины МКК для листов алюминиевых сплавов толщиной 2 мм. Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования изменения механических свойств при растяжении в зависимости от степени развития МКК.

Ключевые слова: межкристаллитная коррозия, алюминиевые сплавы, натурные коррозионные испытания, натурно-ускоренные испытания.

M.G. Abramova¹, A.A. Goncharov¹**CRYSTALLINE CORROSION DEFORMABLE
ALUMINUM ALLOYS DURING NATURAL
AND NATURAL ACCELERATED CORROSION TESTS**

The basic laws of the development of intergranular corrosion of aluminum alloys after full-scale and full-scale accelerated tests in a moderately warm climate of the coastal zone depending on the alloying system are considered. The effect of the geometric grain sizes of alloys of various systems on the depth of the MCC is shown. The dependences of the loss of mechanical properties under tension on the depth of the MCC for sheets of aluminum alloys with a thickness of 2 mm are established. The data obtained can be used to predict changes in mechanical properties under tension, depending on the degree of development of intergranular corrosion.

Keywords: intergranular corrosion, aluminum alloys, field corrosion tests, field accelerated tests.

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

Введение

Использование алюминиевых сплавов в изделиях авиакосмической техники предъявляет повышенные требования к коррозионной стойкости материалов, в том числе в составе контактных пар разнородных соединений, – для обеспечения повышения надежности эксплуатации и увеличения межремонтных сроков службы изделия.

Исключение возможных причин возникновения аварий и отказов авиационной техники (АТ) по причине коррозии алюминиевых сплавов базируется на всесторонних исследованиях климатической стойкости материалов на этапе их разработки и паспортизации, на рациональном конструировании изделий АТ, исключающим образование застойных зон, а также на подконтрольной эксплуатации, сопровождающейся своевременным выявлением и устранением возникающих коррозионных поражений.

Проведение комплексных климатических испытаний для обеспечения безопасной эксплуатации деформируемых алюминиевых сплавов нового поколения, применяемых в качестве основных конструкционных материалов в изделиях авиакосмической техники и позволяющих решить задачи повышения весовой эффективности конструкции при сохранении высокого уровня прочностных и технологических характеристик, относится к приоритетным стратегическим направлениям развития материалов и технологий [1–4].

Опыт эксплуатации изделий АТ показывает, что наиболее часто возникновение коррозионных процессов происходит в обшивке, стрингерном наборе, шпангоутах и балках пола [5, 6].

Стандартно применяемым способом оценки коррозионного состояния изделия АТ является визуальный осмотр, а также неразрушающий контроль. Для алюминиевых сплавов наиболее критичным является образование расслаивающей (РСК) и межкристаллитной коррозии (МКК). Расслаивающая коррозия развивается преимущественно в направлении максимальной деформации и сопровождается отслаиванием отдельных частиц металла, ввиду чего ее можно обнаружить визуально, без применения инструментальных методов исследования. Межкристаллитную коррозию, при которой разрушение происходит по границам зерен вглубь полуфабриката, напротив, невозможно обнаружить не только невооруженным глазом, но даже с применением неразрушающих методов контроля.

В работах [7, 8] приведена методика прогнозирования изменения прочностных свойств конструкций из алюминиевых сплавов с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения, при которой учитывается наибольшее влияние на снижение механических свойств межкристаллитной коррозии. В работе [7] также показано, что для обнаружения МКК возможно использование вихретокового метода контроля, основанного на регистрации изменения электромагнитных характеристик материала. Однако применение данного метода затруднительно при дефектации объектов сложной геометрической формы либо зон крепежных элементов, ввиду чего в настоящее время наиболее достоверным способом определения МКК остается металлографический метод с изготовлением микрошлифа.

Большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей [9–13] направлено на изучение влияния фазово-структурного состава алюминиевых сплавов на склонность к МКК и отработке режимов старения для уменьшения склонности к МКК. Отдельный ряд работ [14, 15] посвящен исследованию МКК с использованием фрактального анализа изображений, а также изучению влияния водорода на процессы развития МКК [16]. Однако исследованию влияния степени подверженности сплавов МКК и изменению их механических свойств посвящено не очень много работ.

Актуальность данной работы определена необходимостью исследования влияния МКК при проведении климатических испытаний конструкционных алюминиевых сплавов, эксплуатирующихся в условиях повышенной агрессивности атмосферы, на изменение механических свойств, что необходимо для отработки предупреждающих мер, направленных на повышение надежной эксплуатации воздушного судна.

Материалы и методы

Материалы для испытаний

В качестве образцов использовали листы толщиной ~2 мм (с предварительно удаленной методом химического травления плакировкой) из алюминиевых сплавов различных систем: Al–Cu–Li, Al–Cu–Mg, Al–Mg–Si, Al–Zn–Mg–Cu и Al–Mg. Для испытаний применяли сплавы, имеющие склонность к МКК.

Сплавы вышеуказанных систем являются 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 сочетанию таких характеристик, как высокая технологичность и освоенность в металлургическом и авиационном производствах, низкая плотность, способствующая повышению весовой эффективности [17, 18].

Методики испытаний

В данной работе проведение испытаний осуществлялось натурным и натурно-ускоренным методами в Геленджикском центре климатических испытаний (ГЦКИ) ВИАМ им. Г.В. Акимова, расположенном на берегу Черного моря и представляющим умеренно теплый климат с мягкой зимой.

Натурные испытания проводили при экспозиции образцов на открытой площадке под углом 45 градусов к горизонту в течение 3 лет с промежуточными съемами образцов. Натурно-ускоренные испытания проводили при горизонтальном расположении образцов на стенде, находящемся под проветриваемым навесом при ежедневном однократном распылении аэрозолей морской воды.

Для металлографического анализа из образца, прошедшего коррозионные испытания, вырезали пластинку в направлении, перпендикулярном прокатке. По плоскости реза изготавливали микрошлиф. Пробоподготовку, шлифование и полировку образцов для микроструктурного анализа проводили на оборудовании фирмы Buehler.

Наличие и глубину МКК определяли по ГОСТ 9.021–74 на металлографическом микроскопе Olympus GX-51 с точностью до 0,01 мм при увеличении до $\times 1000$ с последующей обработкой системой анализа изображений NEXSYS. Обработка изображений в системе NEXSYS производится в цепочке взаимосвязанных ячеек, содержащих исходное изображение, результаты промежуточных этапов обработки, конечное обработанное изображение и результаты измерений в виде чисел, графиков и гистограмм.

Результаты и обсуждение

Характер развития МКК для сплавов различных систем

Основы теории МКК сплавов на основе алюминия были заложены Г.В. Акимовым [19] с использованием теории многоэлектродных систем. Межкристаллитная коррозия относится к электрохимическим процессам и обусловлена тем, что твердый раствор при определенных условиях может расслаиваться с образованием по границам зерен фаз, обогащенных одним из компонентов материала, а участки, непосредственно прилегающие к границам зерен, оказываются обедненными этим компонентом. Под действием той или иной агрессивной среды происходит избирательное анодное растворение либо обогащенных, либо соседних с ними обедненных зон.

На основе результатов экспериментов механизм МКК можно представить в виде развития питтинга, сосредоточенного вследствие структурной неоднородности по границам зерен. Развитие МКК происходит по механизму питтинговой коррозии вблизи границ (катодных фаз). Коррозионная среда в узких микротоннелях подкисляется. В результате происходит расширение и объединение тоннелей в более крупные формирования, т. е. в итоге происходит непрерывное распространение коррозии вблизи границ зерен. Второй механизм МКК [20] – для сплавов, имеющих непрерывные анодные участки по границам зерен, например, для сплавов системы Al–Mg с высоким содержанием магния, где β -фаза может выделяться на границах в виде непрерывных участков. В этом случае необязательной является группировка катодных микроэлементов непосредственно на границах или вблизи них. При этом считают, что матрица должна быть обязательно эффективным катодом по отношению к выделившейся фазе.

Обеднение вакансиями тормозит распад твердого раствора при старении и зоны, свободные от выделений, остаются обогащенными легирующими элементами. В сплавах системы Al–Zn–Mg в зависимости от режимов закалки и старения возможно образование зон, обедненных как вакансиями, так и элементами – цинком и магнием. Подробно виды и особенности развития МКК в алюминиевых сплавах приведены в работе [21].

Чувствительность к МКК зависит от степени распада при закалке, фазовой и электрохимической гетерогенности границ. Увеличивая скорость охлаждения при закалке, можно достичь критических значений, выше которых фазовая МКК не развивается из-за отсутствия структурно-электрохимической гетерогенности границ. Чувствительность к структурной МКК при этом сохранится, хотя она будет меньше, чем у чистого алюминия с учетом меньших размеров зерен [20].

Межкристаллитная коррозия имеет свои индивидуальные особенности для различных алюминиевых сплавов. Наличие единичных очагов МКК может свидетельствовать о дефектах металлургического происхождения или обработки поверхности. При множественных же очагах можно с уверенностью говорить о структурной предрасположенности сплава к МКК.

Глубину МКК определяют по максимальному значению распространения коррозии, определяемой не менее чем по трем образцам, по краю микрошлифа, изготовленному в поперечном направлении [22].

К основным причинам, определяющим степень склонности к МКК алюминиевых сплавов, относят главным образом особенности структурного состояния – размер, ориентацию зерен и фазовый состав выделений по их границам.

Далее приведены результаты исследования влияния геометрических размеров и преимущественной ориентации зерна пяти сплавов на глубину МКК. На рис. 1 представлено сопоставление средних размеров зерна для сплавов пяти систем с глубиной МКК. Проведено не менее чем по 20 измерений на каждый образец показателей вертикального и горизонтального размеров зерна (относительно края микрошлифа), при этом вертикальный размер характеризовал вытянутость зерна в глубину микрошлифа, а горизонтальный – в направлении края микрошлифа. Под термином «средняя глубина МКК» в данном случае понимается усредненное значение глубины МКК после 2 лет натурной экспозиции на открытой площадке в условиях умеренно теплого климата ГЦКИ сплавов каждой системы.

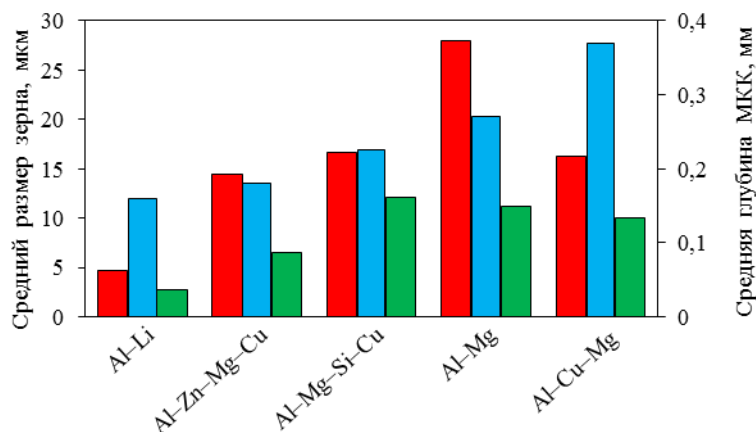


Рис. 1. Сопоставление средних размеров зерна с глубиной МКК для листов толщиной 2 мм из деформируемых алюминиевых сплавов различных систем:

■ – горизонталь; ■ – вертикаль; ■ – средняя глубина МКК

Как видно из данных рис. 1, наблюдается некоторая корреляция глубины МКК от геометрических размеров зерна. Исключение составляют лишь сплавы системы Al–Mg (магналии), отличающиеся высокой коррозионной стойкостью вследствие своего фазово-структурного состава.

Помимо глубины МКК также важное значение имеет характер ее распространения, под которым следует понимать процентное отношение протяженности поверхности образца по краю микрошлифа, подверженной МКК, к общей протяженности края микрошлифа. В работе [7] приведена градация характера распространения МКК по пятибалльной шкале по краю микрошлифа (с одной стороны):

I – МКК отсутствует;

II – единичные очаги МКК (3–5 шт.);

III – очаги МКК в общей сложности занимают менее половины протяженности края микрошлифа;

IV – множественные очаги МКК;

V – непрерывное распространение МКК по всему краю микрошлифа.

Неоднократно доказано [23, 24], что МКК оказывает влияние главным образом на увеличение потерь механических свойств алюминиевых сплавов. Согласно ГОСТ 9.908–85 [25], потери механических свойств являются интегральным показателем межкристаллитной коррозии (наряду с коррозионным растрескиванием). При этом параметр глубины МКК влияет непосредственно на степень снижения показателя механических свойств, характер же распространения МКК обуславливает вероятность возникновения разрушения при механических испытаниях в максимальном очаге МКК.

С методической точки зрения при натуральных испытаниях – в отличие от натурно-ускоренных, при которых коррозионное разрушение протекает более равномерно по поверхности образца [26] – коррозионное разрушение образцов из алюминиевых сплавов происходит неравномерно по поверхности с образованием единичных коррозионных очагов, поэтому при изготовлении образцов-лопаток для испытаний на растяжение зачастую данные коррозионные очаги не попадают в зону рабочей части образца, ввиду чего данные по изменению механических свойств могут получаться завышенными.

Далее приведены особенности характера распространения МКК по краю микрошлифа для каждой системы сплавов, а также проведен расчет стандартного отклонения (σ) соотношения «горизонталь/вертикаль» для исследования влияния величины разбросов геометрических размеров зерна, определенных по 20 значениям на каждый сплав, на степень подверженности сплава развитию МКК.

Сплавы системы Al–Cu–Li характеризуются самой мелкоячеистой структурой из исследованных в данной работе сплавов (соотношение средних геометрических размеров зерна по горизонтали и вертикали составляет 4,7/2,7 мкм), для них характерно развитие нечеткой сетки МКК (растворение по границам зерен происходит с образованием очень тонких «усов» МКК) со скругленными гранями, различимой при увеличении не менее $\times 500$ (рис. 2). Для сплавов данной системы также характерно наличие в большей степени растратов приповерхностных слоев (рис. 2, а), среди которых можно увидеть редкие элементы МКК. Характер распространения МКК по краю микрошлифа составляет: II–III балл – при натуральных испытаниях, III–IV балл – при натурно-ускоренных испытаниях (в зависимости от конкретного сплава), величина $\sigma=0,326$.

Для сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu соотношение «горизонталь/вертикаль» составляет 14,44/6,56 мкм, характер распространения МКК по краю микрошлифа при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях соответствует II–III баллу, отмечается наличие растратов по поверхности, границы зерен – остроугольные. Аналогичный характер распространения МКК отмечается и для сплавов системы Al–Cu–Mg при более скругленных границах, соотношение «горизонталь/вертикаль» составляет 16,29/10,06 мкм (рис. 3). Величина σ для сплавов систем Al–Zn–Mg–Cu и Al–Cu–Mg составляет 0,12 и 0,295 соответственно.

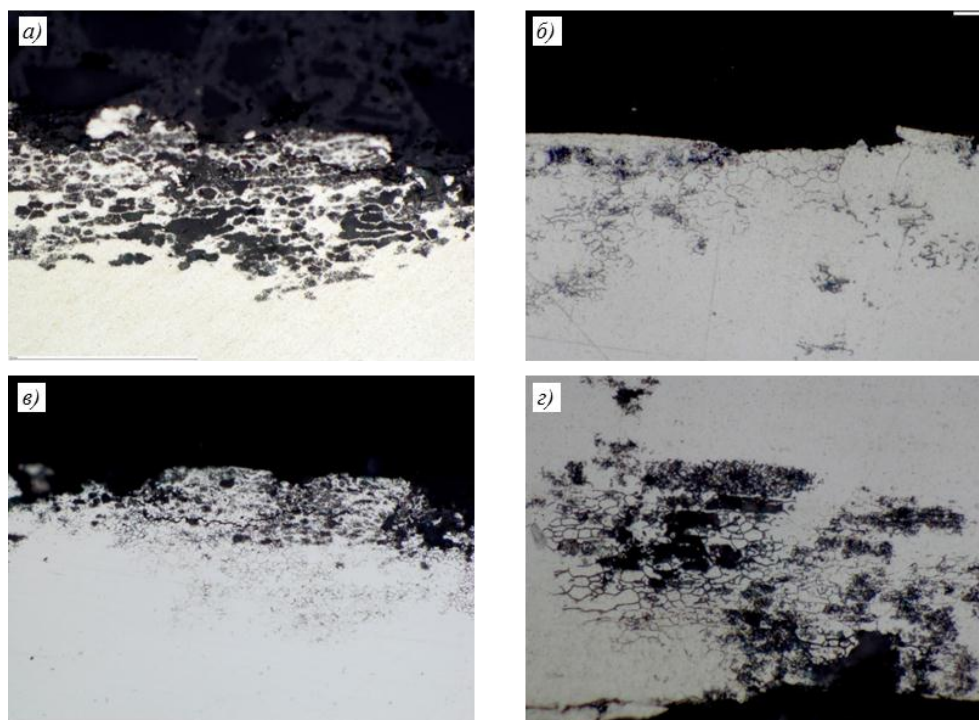


Рис. 2. Характерное распространение МКК для сплавов системы Al–Cu–Li: *a* – растравы приповерхностных слоев; *б–г* – участки с межкристаллитной коррозией

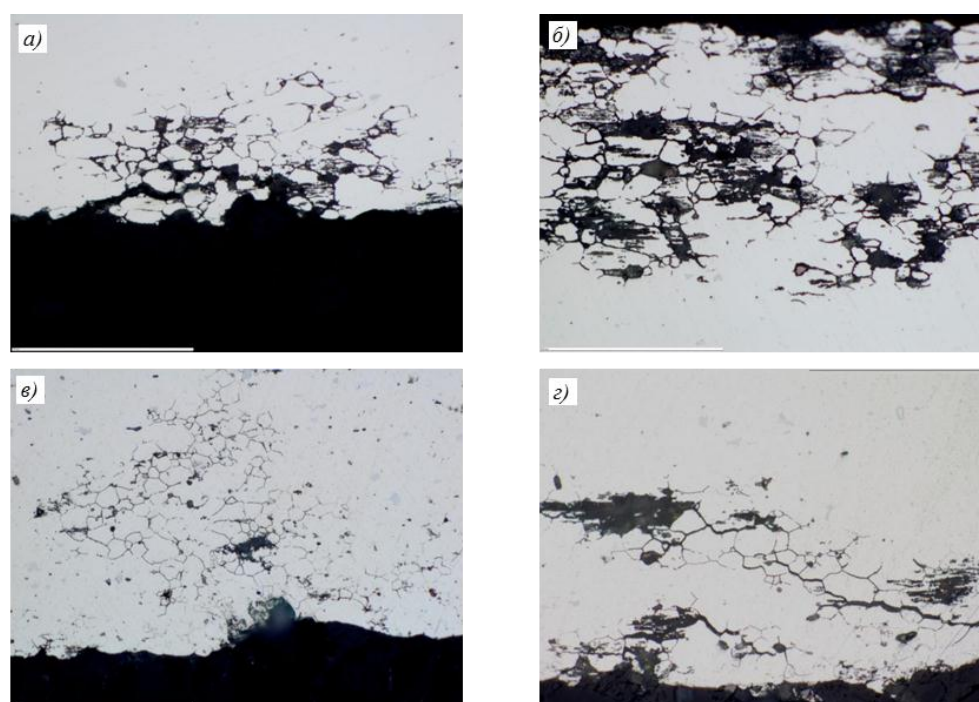


Рис. 3. Характерное распространение МКК для сплавов систем Al–Cu–Mg (*a, б*) и Al–Zn–Mg–Cu (*в, г*)

Соотношение геометрических размеров зерна «горизонталь/вертикаль» для сплавов системы Al–Mg–Si составляет 16,64/12,11 мкм, характер распространения МКК по краю микрошлифа соответствует: II–III баллу – при натуральных испытаниях, III–IV баллу – при натурно-ускоренных испытаниях, границы зерен скругленные, отмечается наличие растравов (рис. 4), величина σ составляет 0,315.

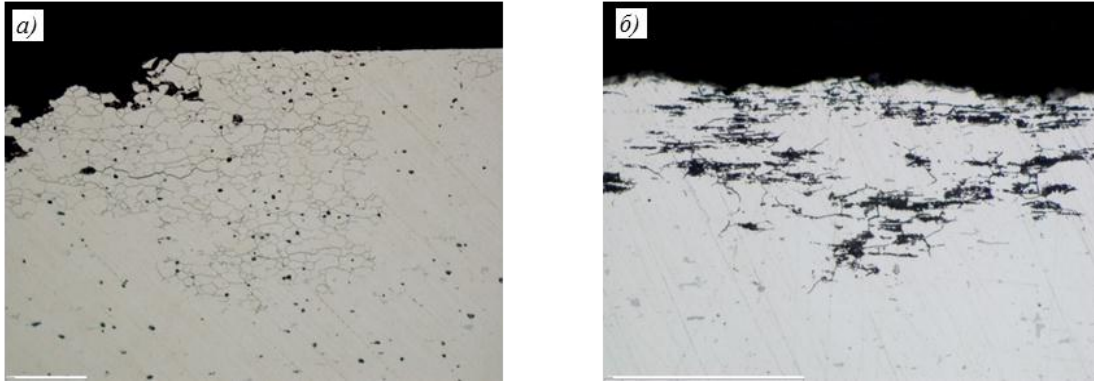


Рис. 4. Характерное распространение МКК для сплавов системы Al–Mg–Si

При рассмотрении зависимости глубины МКК, приведенной на рис. 1, от величины среднеквадратического отклонения геометрических размеров зерна можно видеть, что данные параметры не связаны друг с другом. Влияние на глубину МКК оказывает непосредственно размер зерна.

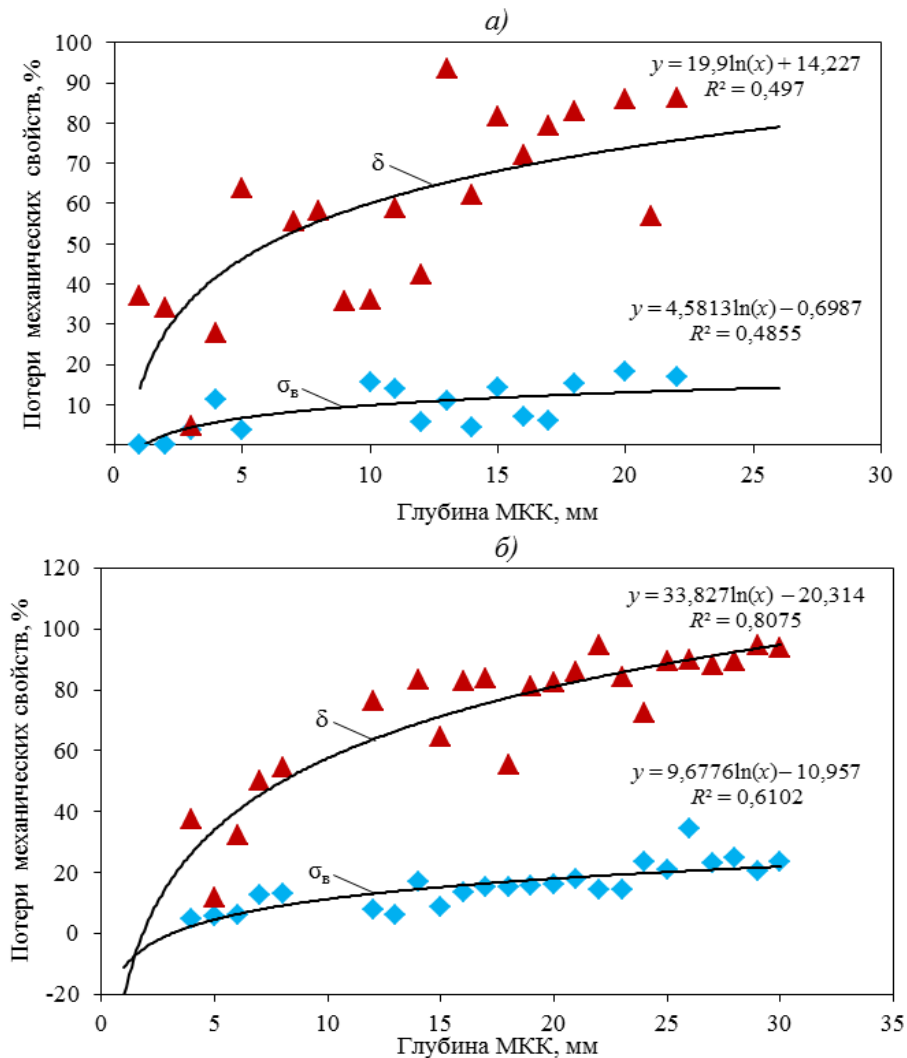


Рис. 5. Соответствие глубины МКК потерям механических свойств образцов из листов алюминиевых сплавов толщиной ~ 2 мм при проведении натуральных (а) и натурно-ускоренных испытаний (б)

В работе [23] показана возможность прогнозирования роста глубины МКК с использованием степенной зависимости при условии апеллирования данными по длительным натурно-ускоренным испытаниям, которые впоследствии могут быть использованы для прогнозирования изменения потерь механических свойств с использованием интегрального коэффициента коррозионного разрушения [7].

Далее приведены результаты анализа полученных значений потерь механических свойств по показателям предела прочности при растяжении и относительного удлинения для образцов алюминиевых сплавов из листов толщиной ~2 мм при проведении натуральных и натурно-ускоренных испытаний. На рис. 5 приведены значения потерь механических свойств в зависимости от глубины МКК для листов толщиной ~2 мм. Видно, что полученные значения аппроксимируются логарифмической зависимостью с наибольшим коэффициентом корреляции для натурно-ускоренных испытаний, что объясняется более равномерным коррозионным разрушением поверхности образцов при проведении испытаний с обливом.

Как видно из графиков, характеристика пластичности, описываемая параметром относительного удлинения, в наибольшей степени подвержена изменению при развитии коррозионных поражений – при глубине МКК 0,4 мм (что составляет 20% от толщины двухмиллиметрового листа) потери относительного удлинения достигают 80–85%, при этом потери относительного сопротивления при растяжении не превышают 20%.

Заключения

Проведено исследование характера развития МКК для листов толщиной 2 мм деформируемых алюминиевых сплавов систем Al–Cu–Li, Al–Cu–Mg, Al–Mg–Si, Al–Zn–Mg–Cu и Al–Mg; выявлено, что характер распространения МКК по краю микрошлифа соответствует большему баллу при натурно-ускоренных испытаниях с нанесением аэрозолей растворов морской соли по сравнению с баллом при натуральных испытаниях.

По результатам исследования влияния геометрических размеров зерна показано, что увеличение данного параметра соответствует увеличению глубины МКК, при этом наименьшая склонность к МКК характерна для сплавов системы Al–Cu–Li, обладающих самой мелкозеренной структурой из исследованных сплавов. Величина разброса геометрических размеров зерна не оказывает влияния на увеличение глубины МКК.

Получены зависимости потерь механических свойств при растяжении от глубины МКК для листов алюминиевых сплавов толщиной ~2 мм при проведении натуральных и натурно-ускоренных испытаний. Показано, что кривые аппроксимируются логарифмической зависимостью с наибольшим коэффициентом корреляции для натурно-ускоренных испытаний, что объясняется более равномерным коррозионным разрушением поверхности при данном виде испытания.

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С.157–167.

3. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
4. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 2. Новые подходы к оценке коррозионности приморских атмосфер // *Коррозия: материалы, защита*, 2016. №1. С. 1–15.
5. Зубарев А.П., Лапаев А.В., Лапаев В.П. Использование обобщенного параметра коррозионного поражения для оценки долговечности элементов конструкций с коррозионными поражениями // *Научный вестник Мос. гос. техн. ун-та гражданской авиации*. 2007. №119. С. 30–32.
6. Акоюн К.Э., Лапаев А.В., Семин А.В. Анализ коррозионного состояния самолетов Ту-154М ОАО Авиакомпания «АЭРОФЛОТ-РАЛ» по данным материалов технического обслуживания в объеме формы «2» // *Научный вестник Мос. гос. техн. ун-та гражданской авиации*. 2007. №119. С. 24–29.
7. Курс М.Г., Антипов В.В., Луценко А.Н., Кутырев А.Е. Интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 24–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-24-32.
8. Курс М.Г. Прогнозирование прочностных свойств обшивки ЛА из деформируемого алюминиевого сплава В95о.ч.-Т2 с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2018. №5 (65). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-101-109.
9. Zhang X., Zhou X., Hashimoto T. et al. The influence of grain structure on the corrosion behaviour of 2A97-T3 Al-Cu-Li alloy // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 116. P. 14–21. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.12.005.
10. Liu Y., Pan Q., Li H. et al. Revealing the evolution of microstructure, mechanical property and corrosion behavior of 7A46 aluminum alloy with different ageing treatment // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 792. P. 32–45.
11. De Bonfils-Lahovary M.-L., Laffont L. Characterization of intergranular corrosion defects in a 2024T351 aluminium alloy // *Corrosion Science*. 2017. No. 119. P. 60–67. DOI: 10.1016/j.corsci.2017.02.020.
12. Zhang X., Zhou X., Hashimoto T. et al. Localized corrosion in AA2024-T351 aluminium alloy: Transition from intergranular corrosion to crystallographic pitting // *Materials Characterization*. 2017. No. 130. P. 230–236. DOI: 10.1016/j.matchar.2017.06.022.
13. Xu Y., Wang X., Yan Z., Li J. Corrosion Properties of Light-weight and High-strength 2195 Al-Li Alloy // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2011. Vol. 24. P. 681–686.
14. Roberge P.R., Trethewey K.R. The fractal dimension of corroded aluminium surfaces // *Journal of Applied Electrochemistry*. 1995. Vol. 25. Issue 10. P. 962–966.
15. Horvath V.K., Herrmann H.J. The fractal dimension of corrosion cracks // *Chaos, Solitons & Fractals*. 1991. No. 5. P. 395–400.
16. De Bonfils-Lahovary M.-L., Josse C., Laffont L., Blanc C. Influence of hydrogen on the propagation of intergranular corrosion defects in 2024 aluminium alloy // *Corrosion Science*. 2019. Vol. 148. P. 198–205.
17. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 167–182.
18. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминийлитиевые сплавы для самолетостроения // *Металлург*. 2012. №5. С. 31–35.
19. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1945. 414 с.
20. Основные закономерности коррозии алюминия // Центральный металлический портал РФ [Электронный ресурс]. URL: http://metallcheckiy-potal.ru/articles/zashita_ot_korrozii_metalla/aluminii/osnovnie_zakonovernosti_korrozii_alyminia/3 (дата обращения: 23.09.2019).

21. Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1986. С. 37–43.
22. ГОСТ 9.021–74. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию. М.: Стандартиформ, 1974. 4 с.
23. Курс М.Г., Кутырев А.Е. Применение интегрального коэффициента коррозионного разрушения для прогнозирования изменения прочностных свойств деформируемых алюминиевых сплавов // Современное материаловедение: традиции отечественных научных школ и инновационный подход: сб. докл. Всерос. молодежной науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2017. С. 132–142.
24. 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.
25. ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М.: Изд-во стандартов, 1985. 34 с.
26. 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.