

УДК 620.1193:669.815

*А.Е. Кутырев¹, Д.В. Чесноков¹, В.В. Антипов¹, А.И. Вдовин¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО АНОДНОГО РАСТВОРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С НЕВЫСОКОЙ СКЛОННОСТЬЮ К МКК НА ПРИМЕРЕ СПЛАВА СИСТЕМЫ Al–Li–Cu С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИ АТМОСФЕРНОЙ КОРРОЗИИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-109-118

Представлены данные по применению последовательного комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Li–Cu в двух растворах при различных режимах – разном соотношении удельного количества электричества. Проведена оценка полученных коррозионных поражений методами оптической и конфокальной микроскопии, определены зависимости потери массы, глубины питтинговой и межкристаллитной коррозии, а также изменения предела прочности от величины удельного количества электричества. Предложены модели прогнозирования потери предела прочности от величины удельного количества электричества (или потери массы) при атмосферной коррозии.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, питтинговая коррозия, межкристаллитная коррозия, анодное растворение, натурные испытания, прогнозирование коррозии.*

*A.E. Kutyrev¹, D.V. Chesnokov¹, V.V. Antipov¹, A.I. Vdovin¹***A STUDY OF THE USE OF COMBINED ANODIC DISSOLUTION OF ALUMINUM ALLOYS WITH NOT HIGH SENSIBILITY TO IGC EVIDENCE FROM ALLOY OF Al–Li–Cu SYSTEM WITH THE PURPOSE OF PREDICTING LOSS OF MECHANICAL PROPERTIES AT ATMOSPHERIC CORROSION**

The article presents data on combined anodic dissolution of aluminum alloy of Al–Li–Cu system with not high sensibility to intergranular corrosion, consisting in sequential dissolution in two different solutions, with different modes – the ratio of the specific amount of electricity. The obtained corrosion deteriorations were evaluated by optical and confocal microscopy, the dependences of mass loss, the depth of pitting and intergranular corrosion, as well as changes in the tensile strength of the specific amount of electricity for different modes were determined. As a result of the analysis of the obtained data, models for predicting the loss of tensile strength from the value of the specific amount of electricity (or mass loss) in atmospheric corrosion are proposed.

Keywords: *aluminum alloys, pitting corrosion, intergranular corrosion, anodic dissolution, natural exposure, corrosion prediction.*

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

Широкое распространение алюминиевых сплавов в авиационной промышленности обусловлено их исключительными свойствами, такими как низкая удельная плотность и высокая прочность. При этом наиболее часто используемые алюминиевые

сплавы легированы медью, которая значительно повышает их прочностные свойства, но при этом сильно снижает коррозионную стойкость [1]. Однако, как отмечается в работах [2–7], при наличии большого опыта длительной эксплуатации изделий авиационной техники (АТ), а также успехов в области разработки технологий защиты алюминиевых сплавов [2, 8–11] избежать возникновения коррозии на изделиях АТ в настоящее время не представляется возможным.

Как известно, алюминиевые сплавы в атмосферных условиях подвержены локальным видам коррозии, где, наряду с питтинговой коррозией, протекают и более опасные ее виды, в частности межкристаллитная (МКК) и расслаивающая коррозии (РСК) [1], сильно влияющие на прочностные характеристики алюминиевых сплавов. В результате летная годность изделий АТ часто определяется именно степенью образующихся коррозионных поражений [2–7, 12–14].

Для оценки коррозионного состояния изделий АТ и влияния коррозии на безопасность их эксплуатации разрабатывается новый подход к данной проблеме, предусматривающий прогнозирование развития выявленных коррозионных поражений и их воздействие на целостность конструкции изделия [15]. Развитие данного направления требует наличия методов прогнозирования коррозии алюминиевых сплавов, а также методик оценки влияния коррозионных поражений на их прочностные свойства с учетом характера коррозии. Решение этой проблемы может быть реализовано путем разработки комплексной программы коррозионных испытаний алюминиевых сплавов [16], которая дает возможность в том числе установить взаимосвязь между степенью коррозии алюминиевых сплавов и снижением их прочностных свойств.

Наиболее оптимальным подходом для определения указанной взаимосвязи является разработка методики ускоренных испытаний, позволяющей наносить нормированные коррозионные поражения, идентичные происходящим при натуральных испытаниях. В работе [17] представлена разработка ряда электролитов для проведения анодного растворения (АР) образцов алюминиевых сплавов. В исследовании [18] указанные растворы электролитов применялись для разработки методики комбинированного АР алюминиевых сплавов с высокой склонностью к МКК на примере сплава системы Al–Mg–Si–Cu. Выбран режим оптимального нанесения коррозионных поражений посредством комбинированного АР, а также предложены модели для прогнозирования потери предела прочности в результате образования коррозионных поражений. Представлен также подход к прогнозированию потери предела прочности и для алюминиевых сплавов с невысокой склонностью к МКК, однако его реализация требует экспериментальной проверки.

Цель данной работы – разработка режима комбинированного АР, позволяющего получать коррозионные поражения для листового полуфабриката алюминиевых сплавов с невысокой склонностью к МКК для прогнозирования потери предела прочности.

Работа проводилась в рамках реализации комплексной научной проблемы 18.6. «Построение комплексных систем защиты особо опасных и критически важных объектов от природно-техногенных катастроф» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

Материалы и методы

Исследования выполнялись по методике, изложенной в ранее опубликованных работах [17, 18].

В качестве объекта исследования выбран листовый полуфабрикат из алюминиевого сплава системы Al–Li–Cu толщиной 1 мм. Сплав имеет достаточные высокие показатели усталостной долговечности, трещиностойкости и удельной прочности в

сравнении с типовыми алюминиевыми деформируемыми сплавами [20]. Кроме того, сплав при обработке давлением и литье обладает хорошей технологической пластичностью, что дает возможность использовать его для производства в промышленных условиях широкой номенклатуры изделий [21]. В настоящее время освоена технология промышленного производства плит и листов, толщина которых составляет 25–80 и 0,8–6,0 мм соответственно, а также раскатных колец и пресованных профилей с разным сечением [22]. Данный сплав также может применяться в виде листов для сварных обечаек, обшивки фюзеляжа и др.

Сплав системы Al–Li–Cu имеет невысокую склонность к МКК и РСК, но при этом подвержен питтинговой коррозии вследствие достаточно большого содержания меди – до 2% (по массе). Так, при проведении натурных испытаний в г. Геленджике в течение 4 лет значения скорости коррозии сплава (по потере массы) были сопоставимы со значениями для сплава В96. По сравнению со сплавом-аналогом по применению В95о.ч., рассматриваемый сплав обладает повышенными показателями удельной прочности (более чем на 20%), модуля упругости (на 10%) и сопротивления коррозионному растрескиванию (на 10 %), а также сваривается основными видами сварки. Результаты по натурным испытаниям опубликованы в работах [23, 24].

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний склонности алюминиевого сплава системы Al–Li–Cu к локальным видам коррозии показали, что глубина проникновения МКК составила 0,06 мм (согласно ГОСТ 9.021–74), а степень развития РСК 3 балла (согласно ГОСТ 9.904–82). Используемые для сравнения данные натурных испытаний [23, 24] для данного сплава дают подобные величины: 0,06 мм и 2–3 балла соответственно.

Поскольку в работе [18] показано, что на поздних сроках натурных испытаний алюминиевого сплава наибольшее влияние оказывает питтинговая коррозия, то при выборе соотношения между количествами электричества, затрачиваемыми на растворение в растворе 1 и в растворе 2, исходили из следующего факта. Количество электричества, затрачиваемое на АР в растворе 1, в котором и образуются питтинговые коррозионные поражения, причем с тем же фактором питтинговой коррозии, как и при натурных испытаниях, имело большее значение. В связи с этим выбрано соотношение $Q_1/Q_2=2$, где Q_1 – количество электричества, затраченное на АР в растворе 1, а Q_2 – в растворе 2.

В растворе 1 растворение проводили при определенной величине плотности тока ($i=0,004$ А/см²), а в растворе 2 – при двух ее величинах ($i=0,004$ А/см² – режим 1; $i=0,001$ А/см² – режим 2). Данный подход обусловлен тем, что степень коррозионных поражений при анодном растворении в растворе 2 при использовании одинакового количества электричества зависит от режима их нанесения (соотношения плотности тока и продолжительности процесса). При использовании раствора 1 степень коррозионных поражений не зависит от режима их нанесения, поэтому целесообразно наносить коррозионные поражения при максимальной величине анодного тока (с наименьшей продолжительностью процесса).

На рис. 1 представлены микроструктуры, полученные при проведении фрактографического анализа образцов, подвергнутых растворению только в нитратно-сульфатно-хлоридном растворе (рис. 1, а) и комбинированному АР (рис. 1, б) при максимальной величине количества электричества и в том, и в другом случае, а также механическим испытаниям на растяжение. На рис. 1 видно, что при АР в растворе 1 образуются округлые питтинги без дальнейшего распространения коррозии по границам зерен, а при комбинированном АР в двух растворах – как питтинги, так и МКК.

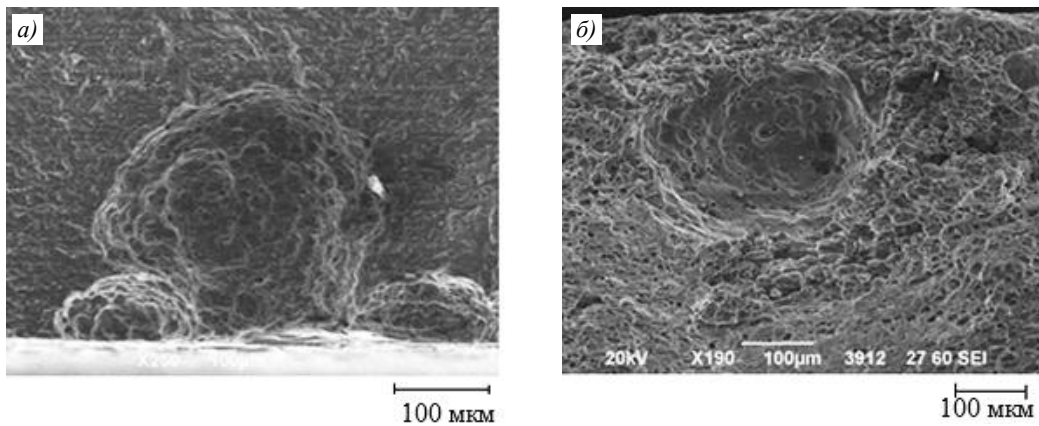


Рис. 1. Микроструктуры образцов из алюминиевого сплава системы Al–Li–Cu после растворения в нитратно-сульфатно-хлоридном растворе (а) и после комбинированного анодного растворения (б), полученные при проведении фрактографического анализа

После нанесения коррозионных поражений в двух растворах определены значения потери массы образцов. Результаты представлены на рис. 2.

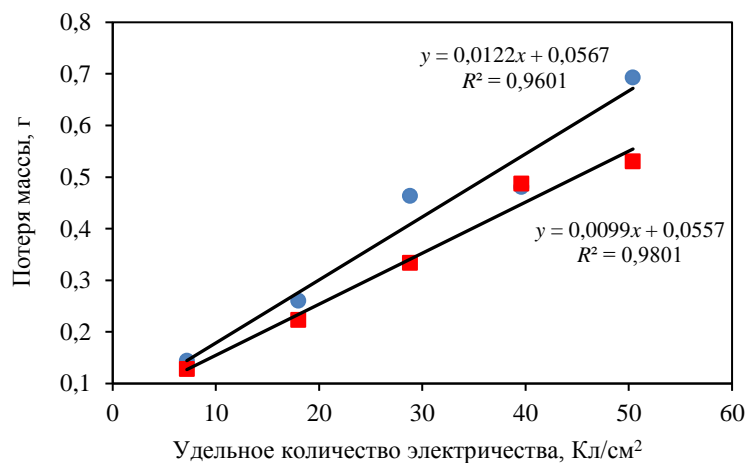


Рис. 2. Зависимость потери массы от количества электричества при комбинированном анодном растворении образцов из сплава системы Al–Li–Cu при различных величинах плотности тока: ● – режим 1; ■ – режим 2

При увеличении количества электричества потеря массы становится больше, что может быть аппроксимировано линейной зависимостью. При этом комбинированном АР сплава системы Al–Li–Cu, как и в случае растворения сплава с высокой склонностью к МКК [18], данные для двух режимов отличаются – при большем количестве электричества (при растворении в сульфатно-хлоридном растворе) потеря массы увеличивается. Ранее указывалось, что повышение мощности питтингового пробоя при большем анодном токе приводит к увеличению продолжительности протекания химической реакции (до момента образования пассивной пленки) – либо за счет локального повышения температуры в месте пробоя, либо за счет увеличения кислотности среды благодаря гидролизу большего количества продуктов коррозии до момента диффузионного выравнивания компонентов раствора.

После нанесения коррозионных поражений в двух растворах также получены результаты глубины питтингов образцов. Результаты представлены на рис. 3.

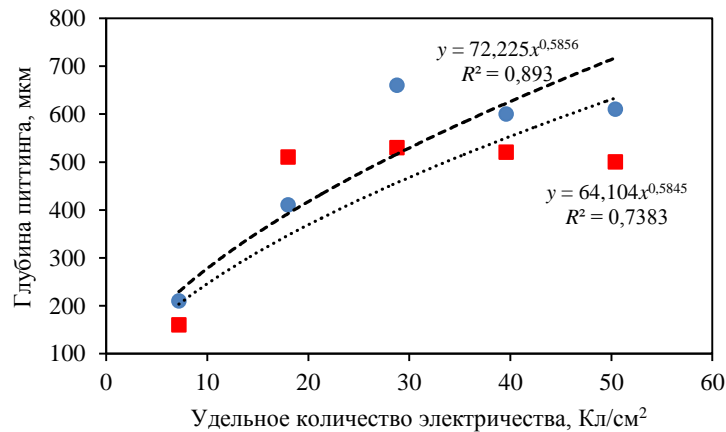


Рис. 3. Зависимость глубины питтингов от количества электричества при комбинированном анодном растворении образцов из сплава системы Al–Li–Cu при различных величинах плотности тока: ● – режим 1; ■ – режим 2

Для режимов 1 и 2 наблюдаются подобные зависимости глубины питтинга от удельного количества электричества, которые могут быть аппроксимированы степенной зависимостью. С учетом большей потери массы для режима 1 комбинированного АР можно ожидать для данного режима и большие глубины питтингов. На рис. 3 видно, что глубины питтингов для режима 1 немного превышают глубины для режима 2.

На рис. 4 представлена зависимость значений потери предела прочности от продолжительности растворения образцов и количества электричества. Использование в качестве прочностной характеристики величины предела прочности обусловлено тем, что указанная величина обладает меньшим разбросом экспериментальных данных по сравнению с усталостной долговечностью. Данный факт особенно актуален для проведения в дальнейшем сравнения данных, полученных при АР, с данными, полученными при натурных испытаниях.

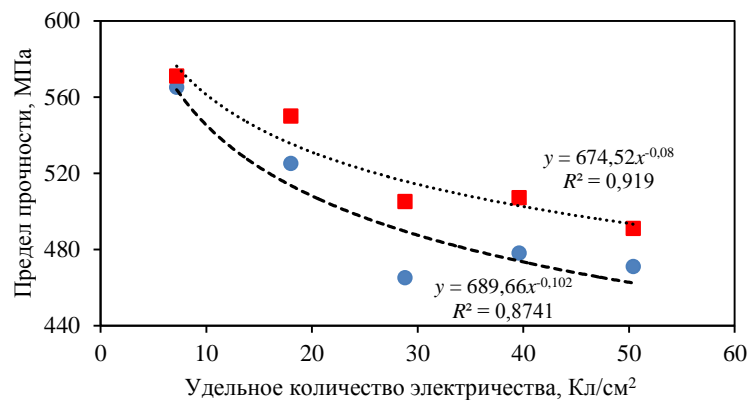


Рис. 4. Зависимость предела прочности от количества электричества при комбинированном анодном растворении образцов из сплава системы Al–Li–Cu при различных величинах плотности тока: ● – режим 1; ■ – режим 2

С увеличением удельного количества электричества наблюдается уменьшение предела прочности, которое в данном диапазоне можно аппроксимировать степенными функциями, представленными на рис. 4. Видно, что для режима 1 снижение прочностных характеристик больше, чем для режима 2, при одинаковых задаваемых величинах количества электричества. Поскольку для режима 1 также получены большие потери

массы, то определение влияния режима АР проводили при построении зависимости предела прочности от величины удельной потери массы (рис. 5).

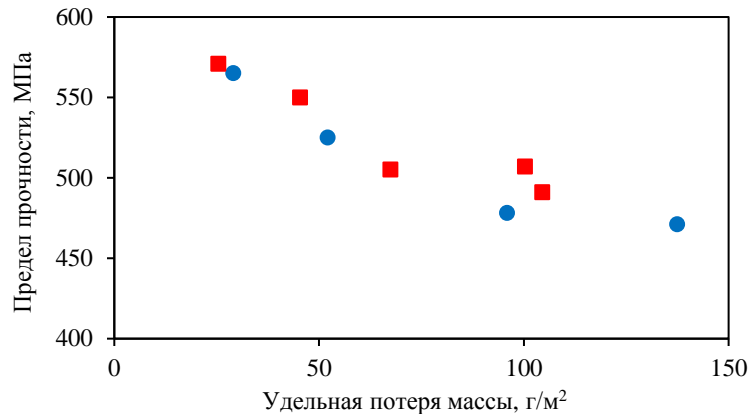


Рис. 5. Зависимость предела прочности от величины удельной потери массы образцов из сплава системы Al–Li–Cu после их комбинированного анодного растворения при различных величинах плотности тока: ● – режим 1; ■ – режим 2

Как видно из данных, представленных на рис. 5, в отличие от зависимостей предела прочности от количества электричества, зависимости предела прочности от потери массы для режимов 1 и 2 практически не различаются. В этом случае для разработки модели влияния коррозионных поражений на прочность алюминиевых сплавов (в данном случае с невысокой склонностью к МКК) можно использовать данные по обоим режимам.

Для дальнейшего анализа соответствия коррозионных поражений на алюминиевом сплаве системы Al–Li–Cu, нанесенных электрохимическим способом путем комбинированного АР, и коррозионных поражений, образующихся в результате натуральных испытаний [23, 24], проведено сравнение влияния указанных коррозионных поражений на величину предела прочности (рис. 6).

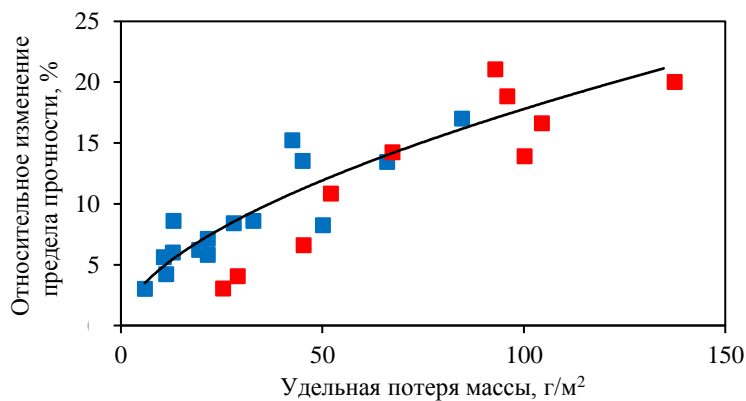


Рис. 6. Зависимость относительного изменения предела прочности образцов из сплава системы Al–Li–Cu от величины их удельной потери массы после проведения натурной экспозиции (■) и комбинированного анодного растворения (■) [23, 24]

Зависимости относительного изменения механической характеристики (предела прочности) образцов из сплава системы Al–Li–Cu от величины их удельной потери массы после проведения натурной экспозиции и комбинированного АР при больших значениях (>50 г/м²) потери массы (или величины удельного количества электричества

АР) практически совпадают. Таким образом, выбранное соотношение количества электричества при растворении в нитратно-сульфатно-хлоридном и в сульфатно-хлоридном растворе (режим комбинированного АР) $Q_1/Q_2=2$ является оптимальным для нанесения коррозионных поражений на алюминиевые сплавы с невысокой склонностью к МКК для прогнозирования потерь их предела прочности. Вследствие совпадения данных, полученных после проведения натуральных испытаний и комбинированного АР по выбранному режиму, другие соотношения количества электричества, приложенного в двух растворах, не рассматривались.

Для более детального анализа проведено сравнение данных по МКК. На рис. 7 представлено металлографическое исследование шлифов образцов из алюминиевого сплава системы Al–Li–Cu после проведения комбинированного АР с высоким значением удельного количества электричества и после натурной экспозиции [23, 24]. Как видно, межкристаллитные поражения очень похожи.

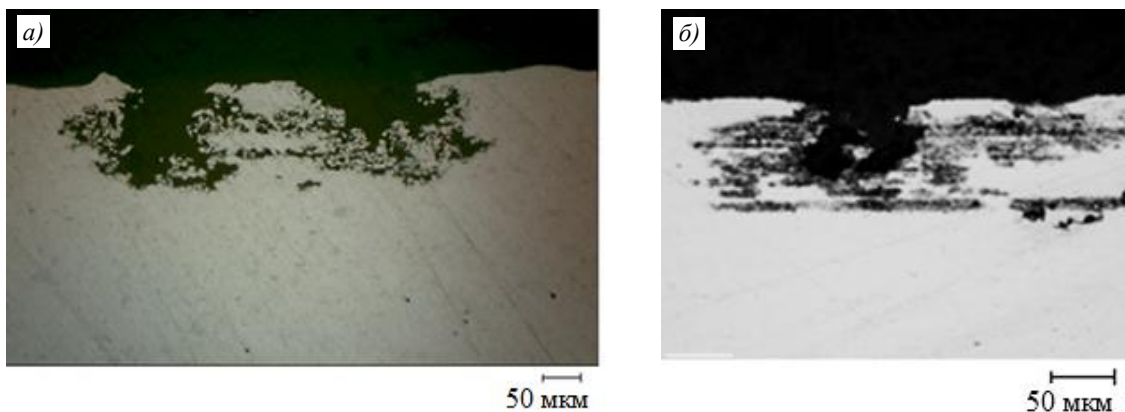


Рис. 7. Металлографическое исследование образцов из сплава системы Al–Li–Cu после проведения комбинированного анодного растворения (а) и после 1 года натурно-ускоренных испытаний с нанесением морской соли в концентрации 10 г/л (б) [23, 24]

На рис. 8 представлены данные по глубине МКК для образцов из сплава системы Al–Li–Cu, прошедших натурную экспозицию и комбинированное АР в зависимости от величины потери массы.

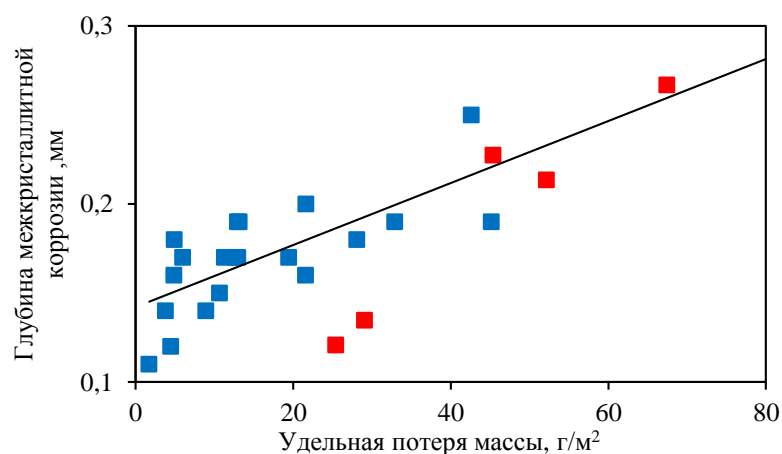


Рис. 8. Зависимость глубины межкристаллитной коррозии от величины удельной потери массы сплава системы Al–Li–Cu после проведения натурной экспозиции (■) и комбинированного анодного растворения (■) [23, 24]

Как видно из данных, представленных на рис. 8, на начальной стадии натуральных испытаний происходит сильное развитие МКК. Очевидно, что в этот период основное влияние на снижение прочностных свойств будут оказывать именно межкристаллитные коррозионные поражения. Поскольку при комбинированном АР до значений удельной потери массы $<50 \text{ г/м}^2$ значения глубин МКК оказываются меньше, чем при натуральных испытаниях при тех же значениях удельной потери массы, то и, соответственно, в этот период значения потерь предела прочности (рис. 6) также оказываются меньше.

Причиной столь высокой скорости МКК в начальный период натуральных испытаний, вероятно, является большая доля реакции по химическому механизму растворения алюминия после пробоя пассивной пленки в области границ зерен. Сегрегация катодных включений вблизи границ зерен приводит к большей разности потенциалов катодных и анодных участков, что способствует, согласно представлениям о механизме питтинговой коррозии [25, 26], большему значению тока пробоя, и, соответственно, к более значительному выделению энергии. Заметим, что МКК имеет общий электрохимический механизм с питтинговой коррозией [1].

При длительном протекании процессов коррозии алюминиевых сплавов даже с невысокой склонностью к МКК, а также с относительно малой скоростью коррозии при натуральных испытаниях (в отличие от ускоренных) большая доля химической реакции окисления алюминия на границе зерен приводит к большей скорости развития МКК. С использованием комбинированного АР такой скорости развития МКК при небольших значениях удельной потери массы ($<50 \text{ г/м}^2$) добиться не удалось. Скорее всего, за этот период добиться воспроизведения коррозионных поражений, идентичных происходящим при натуральных испытаниях, т. е. с таким же соотношением между питтинговой коррозией и МКК, с помощью АР в гальваностатическом режиме принципиально нельзя. Вероятно, это возможно реализовать с применением АР в импульсном режиме, что требует дополнительного исследования.

В дальнейшем при натуральных испытаниях из-за возрастания омической составляющей разности потенциалов вследствие диффузионных ограничений [27, 28] разность потенциалов между катодными и анодными участками уменьшается, что приводит к снижению скорости развития МКК. В результате при величине удельной потери массы $>50 \text{ г/м}^2$ при комбинированном АР значения глубин МКК становятся близки к значениям, полученным при натуральных испытаниях (рис. 8). С учетом нанесения питтинговых коррозионных поражений во время первой стадии комбинированного АР с тем же фактором питтинговой коррозии, как и при натуральных испытаниях [17], получено совпадение по величинам потери предела прочности после натуральных испытаний и после примененного режима комбинированного АР. Поскольку методика прогнозирования должна применяться на длительный период климатического воздействия, то можно заключить, что разработанный подход по нанесению коррозионных поражений на листовые полуфабрикаты из алюминиевых сплавов с невысокой склонностью к МКК путем комбинированного АР и экспериментальное определение предела прочности работоспособны и могут использоваться при значениях удельной потери массы $>50 \text{ г/м}^2$.

Следует отметить, что величина удельной потери массы (или удельного количества электричества) при применении данной экспериментальной модели прогнозирования снижения предела прочности может быть использована в качестве критерия коррозионной повреждаемости алюминиевых сплавов, как это предложено в работах [29, 30].

Заключения

Разработана методика нанесения коррозионных поражений на листовые полуфабрикаты из алюминиевых сплавов с невысокой склонностью к МКК путем комбинированного АР – сначала в нитратно-сульфатно-хлоридном растворе, а затем в сульфатно-хлоридном. Выбраны оптимальные режимы нанесения коррозионных поражений на

листовые полуфабрикаты из алюминиевых сплавов с невысокой и высокой склонностью к МКК на основе их соответствия коррозионным поражениям, полученным при натуральных испытаниях.

На основе методики нанесения коррозионных поражений на листовые полуфабрикаты из алюминиевых сплавов с невысокой склонностью к МКК (на примере сплава системы Al–Li–Cu) предложена экспериментальная модель прогнозирования потери прочностных свойств, которая позволяет установить в качестве критерия коррозионной повреждаемости алюминиевых сплавов величину удельного количества электричества (или потери массы), необходимого для разработки методики прогнозирования атмосферной коррозии алюминиевых сплавов.

Библиографический список

1. Синявский В.С., Вальков В.Д., Будов Г.М. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1979. 224 с.
2. Agarwala V.S. Aircraft corrosion and aging: problems and controls // Proceedings of 15th ICC. Granada, 2002. P. 3–12.
3. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. №187. С. 83–91.
4. Садков В.В., Миркин И.И. Обеспечение коррозионной стойкости алюминиевых конструкций в самолетах «Ту» // Цветные металлы. 2006. №11. С. 73–76.
5. 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.
6. Бутушин С.В., Ковалевский С.А., Шапкин В.С. Анализ коррозионных повреждений силовой конструкции планера самолетов типа Ан-24 // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. №130. С. 41–47.
7. Бычков А.С., Игнатович С.Р., Моляр А.Г. Основные виды и причины разрушения конструктивных элементов из алюминиевых сплавов отечественных воздушных судов транспортной категории // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2015. №70. С. 136–151.
8. Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З., Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике. М.: Наука, 2001. 192 с.
9. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // Materials and Design. 2014. Vol. 56. P. 862–871.
10. Каримова С.А., Чесноков Д.В. Перспективные технологии для защиты от коррозии и ремонта авиационной техники // Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №4. Ст. 05. URL: <https://materialsnews.ru> (дата обращения: 26.08.2020).
11. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тезисы докладов XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
12. Кацура А.В. Исследование влияния коррозионных повреждений на долговечность элементов конструкций летательных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2001. 15 с.
13. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
14. Семин А.В. Метод уточнения характеристик живучести силовых элементов планера длительно эксплуатируемых воздушных судов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011. 23 с.
15. Bellinger N.C., Liao M. Corrosion and fatigue modeling of aircraft structures // Corrosion Control in the Aerospace Industry. Woodhead Publishing, 2009. P. 172–191.
16. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В. Анализ данных по натурным испытаниям алюминиевых сплавов и разработка их комплексных коррозионных испытаний // Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. 2018. С. 80. URL: <https://conf.viam.ru> (дата обращения: 07.09.2020).

17. Кутырев А.Е., Чесноков Д.В., Антипов В.В., Вдовин А.И. Разработка раствора для нанесения коррозионных поражений на алюминиевых сплавах в гальваностатическом режиме // Труды ВИАМ. 2018. №9 (69). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 21.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-105-118.
18. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Чесноков Д.В., Кутырев А.Е. Исследование применения комбинированного анодного растворения алюминиевого сплава системы Al–Mg–Si–Cu с целью прогнозирования потери механических свойств при атмосферной коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2020. №2 (59). С. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
19. 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.
20. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-техн. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 163–171.
21. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.Ю. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg // Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 07.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-1-1.
22. Клочкова Ю.Ю., Клочков Г.Г., Романенко В.А., Бурляева И.П. Структура и свойства массивных прессованных полуфабрикатов из высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Труды ВИАМ. 2015. №9. Ст. 04. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 13.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-4-4.
23. Курс М.Г. Метод расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения листов из деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 147 с.
24. 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.
25. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum // Corrosion Science. 1999. Vol. 41. P. 1743–1767.
26. 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.
27. Фрейман Л.И. Стабильность и кинетика развития питтингов // Итоги науки и техники. Сер.: Коррозия и защита от коррозии. 1985. Т. 11. С. 3–71.
28. Frankel G.S. Pitting corrosion of metals. Review of the critical factors // Journal of Electrochemical Society. 1998. Vol. 145. P. 2186–2198.
29. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Каримова С.В. Прочностные характеристики материалов планера самолетов в условиях высокой влажности // Вопросы материаловедения. 2013. Т. 73. №1. С. 220–229.
30. 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.