

Научная статья

УДК 620.193.4

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-159-168

ВЛИЯНИЕ МЕЖОПЕРАЦИОННОГО ХРАНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ

С.Е. Морозова¹, И.А. Волков¹, М.А. Кольцова¹

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

Аннотация. Исследовано влияние продолжительности и условий хранения образцов из алюминиевых сплавов 1163-T1 и 1441-RT1 в период между ускоренными коррозионными испытаниями на склонность к межкристаллитной коррозии и изготовлением микрошлифов на изменение характера и глубины коррозионных поражений. Установлено, что средняя глубина коррозионных поражений существенно возрастает в зависимости от продолжительности и условий хранения. По результатам исследований сделаны выводы и даны практические рекомендации по проведению ускоренных испытаний на склонность к межкристаллитной коррозии.

Ключевые слова: межкристаллитная коррозия, ускоренные коррозионные испытания, алюминиевые сплавы, пробоподготовка, условия хранения образцов, металлографический анализ

Для цитирования: Морозова С.Е., Волков И.А., Кольцова М.А. Влияние межоперационного хранения образцов на результаты металлографической оценки межкристаллитной коррозии // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 159–168. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-159-168.

Scientific article

INFLUENCE OF INTER-OPERATIONAL STORAGE ON METALLOGRAPHIC EVALUATION OF INTERGRANULAR CORROSION

S.E. Morozova¹, I.A. Volkov¹, M.A. Koltsova¹

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

Abstract. This study investigates the effect of storage time and conditions on the changes in the morphology and depth of corrosion damage of 1163-T1 and 1441-RT1 aluminum alloy specimens during the interval between accelerated intergranular corrosion testing and metallographic section preparation. It has been determined that the mean corrosion depth increases significantly depending on storage time and conditions. Based on the experimental findings, conclusions are drawn and practical recommendations for conducting accelerated intergranular corrosion tests are provided.

Keywords: intergranular corrosion, accelerated corrosion testing, aluminum alloys, sample preparation, specimen storage condition, metallographic analysis

For citation: Morozova S.E., Volkov I.A., Koltsova M.A. Influence of inter-operational storage on metallographic evaluation of intergranular corrosion. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 159–168. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-159-168.

Введение

Алюминиевые сплавы занимают основное место среди конструкционных материалов, применяемых в авиационной технике [1]. На протяжении длительного времени в отечественном авиастроении в качестве обшивки планера широко используются деформируемые алюминиевые сплавы марок 1163 и 1441 [2].

Сплав 1163 относится к классу высокоресурсных дюралюминов системы Al–Cu–Mg повышенной чистоты. Благодаря снижению содержанию примесей железа и кремния он обладает высокими характеристиками усталостной долговечности и трещиностойкости, что определяет его широкое применение в обшивке фюзеляжа и других силовых элементах планера современных отечественных воздушных судов. Наличие меди в качестве основного легирующего элемента неизбежно повышает склонность данного сплава к межкристаллитной коррозии (МКК) [3, 4]. Указанный вид локального коррозионного поражения является одним из наиболее опасных, поскольку развивается преимущественно вдоль границ зерен, не сопровождается явными внешними признаками и способен приводить к существенному снижению механических свойств и преждевременному разрушению деталей в условиях эксплуатации [5, 6].

Сплав 1441 представляет собой среднепрочный высокомодульный алюминий-литиевый сплав второго поколения системы Al–Cu–Mg–Li. Введение лития обеспечивает снижение плотности до 2,6 г/см³ и повышение модуля упругости по сравнению с традиционными дюралюминами, что в сочетании с высокими ресурсными характеристиками (сопротивлением усталости и трещиностойкостью) определяет его применение в качестве альтернативы сплаву 1163 для обшивки фюзеляжа, стрингерного набора и элементов внутреннего набора планера [7, 8]. Листы из сплава 1441 серийно применяются в гидросамолетах Бе-103 и Бе-200, а его использование обеспечило снижение массы конструкции планера на 10 % [9]. Вместе с тем присутствие меди в составе сплава также обуславливает его склонность к МКК, что требует строгого контроля данной характеристики на всех этапах производства и сертификации полуфабрикатов.

Определение склонности к МКК в обязательном порядке входит в перечень характеристик, устанавливаемых при паспортизации материала, а предельные значения данного показателя регламентируются нормативными документами на алюминиевые полуфабрикаты (ТУ, ГОСТ). Стойкость к МКК является одной из ключевых характеристик, учитываемых при разработке режимов термической обработки наряду с требованиями к механическим и технологическим свойствам, а также при отработке изготовления новой номенклатуры полуфабрикатов с использованием перспективных металлургических единиц оборудования [10–12].

На территории РФ основным нормативным документом, регламентирующим порядок проведения ускоренных испытаний алюминиевых сплавов на склонность к МКК, является ГОСТ 9.021–74. Вместе с тем стандарт не содержит требований к условиям и срокам хранения образцов в период между завершением коррозионных испытаний и изготовлением микрошлифов, что может оказывать влияние на результаты металлографической оценки характера поражений.

Цель данной работы – исследование влияния продолжительности и условий межоперационного хранения образцов после ускоренных испытаний на склонность к МКК на характер коррозионных поражений, оцениваемых по результатам металлографического анализа, на примере сплавов 1163-T1 и 1441-PT1.

Материалы и методы

Для проведения исследований использованы образцы (с геометрическими размерами $20 \times 10 \times 3$ мм) из алюминиевых сплавов 1441-PT1 (система Al–Cu–Mg–Li) и 1163-T1 (система Al–Cu–Mg). Образцы обработаны в соответствии с ГОСТ 9.021–74 (п. 2.4), лакирующий слой полностью удален с обеих сторон путем травления в 10%-ном растворе NaOH с последующей выдержкой в 30%-ном растворе HNO_3 .

Испытания на склонность к МКК проводили в соответствии с ГОСТ 9.021–74 в растворе № 2 (состав раствора: $58 \text{ г/дм}^3 \text{ NaCl} + 10 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ 33%-ного H_2O_2) при температуре $30 \pm 0,5$ °С, продолжительность испытаний составила 6 ч. Для приготовления раствора № 2 использовали очищенную воду с электропроводностью $\leq 5 \text{ мкСм/см}$, а химические реактивы – со степенью чистоты не менее «Ч». Емкости с раствором помещали в термошкаф с принудительной конвекцией и рабочим диапазоном температур от 25 до 250 °С. После испытаний образцы промывали в проточной холодной воде в течение 15 мин, после чего высушивали в термошкафу при температуре 105 °С в течение 30 мин.

Для изготовления микрошлифов взяты части образцов, предварительно вырезанные на ручном отрезном станке. В качестве охлаждения использована синтетическая охлаждающая жидкость (СОЖ), коррозионно-нейтральная к алюминиевым сплавам, при скорости отрезного диска 2000 об/мин.

Микрошлифы испытанных образцов изготавливали путем горячей запрессовки (по режиму: нагрев при 160 °С и давлении 25 МПа в течение 10 мин, охлаждение в течение 5 мин) в термопластичную акриловую смолу с высокой оптической прозрачностью. После запрессовки проводили шлифовку с последовательным уменьшением зернистости шлифовальной поверхности (рабочая жидкость – вода) с 65 до 9 мкм, с финальной полировкой на дисках из фетра с использованием полировальных жидкостей с размером частиц 3 и 1 мкм.

Металлографические исследования готовых микрошлифов испытанных образцов проводили на инвертированном микроскопе с увеличением до $\times 200$.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Межкристаллитная коррозия – один из наиболее опасных видов коррозионных поражений, который может приводить к потере прочности, пластичности и усталостной долговечности деталей, что создает предпосылки для их внезапного разрушения в условиях эксплуатационных нагрузок. Основная проблема заключается в трудности обнаружения начала процесса разрушения материала, проходящего в глубине между границ зерен, не затрагивая их. При этом внешние признаки коррозионных поражений на поверхности могут не проявляться или быть минимальными [13–15].

В РФ основным нормативным документом, регламентирующим ускоренные испытания на МКК алюминиевых сплавов, является ГОСТ 9.021–74. Но в данном документе отсутствует информация по межоперационному интервалу между испытаниями и изготовлением микрошлифов. В ГОСТ 6032–2017 «Методы испытаний на стойкость против межкристаллитной коррозии» при выявлении МКК металлографическим методом также отсутствует данная информация. Зарубежный стандарт ASTM G110-92 устанавливает процедуры подготовки образцов и условия проведения испытаний, но в нем также отсутствуют требования к срокам и условиям хранения образцов после испытаний до металлографической подготовки. Аналогично стандарт ISO 11846:1995

не регламентирует требования по условиям и срокам хранения образцов после испытаний. Отсутствие данной информации в изученных нормативных документах может приводить к расхождениям в результатах испытаний и разногласиям исследователей в оценке стойкости материалов к МКК.

Для проведения исследований по возможному влиянию условий и сроков хранения испытанных образцов перед изготовлением микрошлифов выбраны алюминиевые сплавы 1163-T1 и 1441-PT1, подготовку и испытания которых проводили согласно ГОСТ 9.021–74. Выбраны следующие условия и сроки хранения:

– выдержка в эксикаторе над силикагелем при постоянной температуре $22,4 \pm 0,5$ °C в течение 1; 3 и 12 ч;

– выдержка в условиях умеренного климата промышленной атмосферы при постоянной температуре $22,1 \pm 0,5$ °C и влажности $27,2 \pm 2,0$ % в течение 1; 3 и 12 ч;

– в цеховых условиях производства при воздействии остаточной агрессивной атмосферы, при постоянной температуре $22,6 \pm 0,5$ °C и влажности $24,7 \pm 2,0$ % в течение 1; 3 и 12 ч.

В качестве нулевой точки сравнения процесс изготовления микрошлифов проводили сразу после операции сушки образцов. Для каждого условия испытаний взято по 3 образца на точку каждого сплава. Исследование микрошлифов проводили при увеличении $\times 200$. Анализу подвергали весь периметр микрошлифа каждого образца с фиксацией характера и глубины коррозионных поражений и последующим определением среднего и максимального значений. Результаты исследований микрошлифов по глубине коррозионных поражений приведены в таблице.

**Средние и максимальные значения глубины
межкристаллитных коррозионных поражений алюминиевых сплавов
при различных условиях хранения**

Сплав	Условия хранения	Продолжительность хранения, ч	Средняя глубина коррозии, мкм	Максимальная глубина коррозии, мкм
1163-T1	Без хранения	0	43,6	122,4
		1	55,4	107,1
	В эксикаторе	3	58,7	112,5
		12	65,2	178,5
		1	54,9	120,0
	Умеренный климат промышленной атмосферы	3	65,2	107,1
		12	65,7	137,7
	В цехе при воздействии остаточной агрессивной атмосферы	1	63,7	159,0
		3	67,5	132,6
		12	68,6	122,4
1441-PT1	Без хранения	0	41,5	91,8
		1	51,7	102,0
	В эксикаторе	3	64,6	107,1
		12	64,8	105,4
	Умеренный климат промышленной атмосферы	1	58,3	153,0
		3	76,8	153,0
		12	76,3	132,6
	В цехе при воздействии остаточной агрессивной атмосферы	1	68,7	162,3
		3	80,3	112,2
		12	80,6	204,1

По результатам исследований выявлена закономерность увеличения средних значений глубины коррозионных поражений в зависимости от условий и продолжительности хранения:

- для сплава 1163-Т1: 27, 34 и 49 % относительно нулевой точки при хранении в эксикаторе; 25, 49 и 50 % при хранении в условиях умеренного климата промышленной атмосферы; 46, 54 и 57 % при хранении в цеховых условиях производства при воздействии остаточной агрессивной атмосферы;

- для сплава 1441-РТ1: 24, 55 и 56 % относительно нулевой точки при хранении в эксикаторе; 40, 85 и 83 % при хранении в условиях умеренного климата промышленной атмосферы; 65, 93 и 94 % при хранении в цеховых условиях производства при воздействии остаточной агрессивной атмосферы.

Данные результаты указывают на продолжающиеся процессы коррозионного разрушения в глубине металла после операций по промывке и сушке. В интервале от 1 до 3 ч процессы наиболее активны, к 12 ч коррозионное разрушение практически прекращается.

При хранении образцов в эксикаторе в условиях минимальной влажности средняя глубина коррозионных поражений наиболее низкая – от 27 до 49 % для сплава 1163-Т1 и от 24 до 56 % для сплава 1441-РТ1 относительно нулевого значения. Промежуточные значения глубины достигаются при хранении в условиях умеренного климата промышленной атмосферы: от 25 до 50 % для сплава 1163-Т1 и от 40 до 83 % для сплава 1441-РТ1. Наибольшие значения глубины обнаружены при хранении в цеховых условиях производства при воздействии остаточной агрессивной атмосферы: от 46 до 57 % для сплава 1163-Т1 и от 65 до 94 % для сплава 1441-РТ1.

Для алюминиевого сплава 1163-Т1 характерен плавный рост средней глубины коррозионных поражений: от 25 до 57 % от нулевых значений в зависимости от условий и продолжительности хранения, для сплава 1441-РТ1 – от 24 до 94 %.

Следует отметить, что наибольшие значения средней глубины коррозионных поражений при хранении в цеховых условиях не объясняются одной лишь влажностью атмосферы: зафиксированная в цехе относительная влажность ($24,7 \pm 2,0$ %) меньше, чем в условиях умеренного климата промышленной атмосферы ($27,2 \pm 2,0$ %). Следовательно, определяющее значение имеет не столько содержание влаги в воздухе, сколько загрязненность атмосферы агрессивными компонентами – парами кислот, аэрозолями СОЖ и технологической пылью, присутствующими в производственных помещениях. Данные вещества, адсорбируясь на поверхности образцов и в полостях коррозионных трещин, по-видимому, усиливают агрессивность остаточной среды и интенсифицируют процесс вторичного коррозионного растрыва.

Максимальная обнаруженная глубина коррозионных поражений не демонстрирует устойчивой корреляции со средними значениями, условиями хранения и продолжительностью выдержки.

Типичные изображения отдельных межкристаллитных коррозионных поражений для сплава 1163-Т1 приведены на рис. 1, для сплава 1441-РТ1 – на рис. 2.

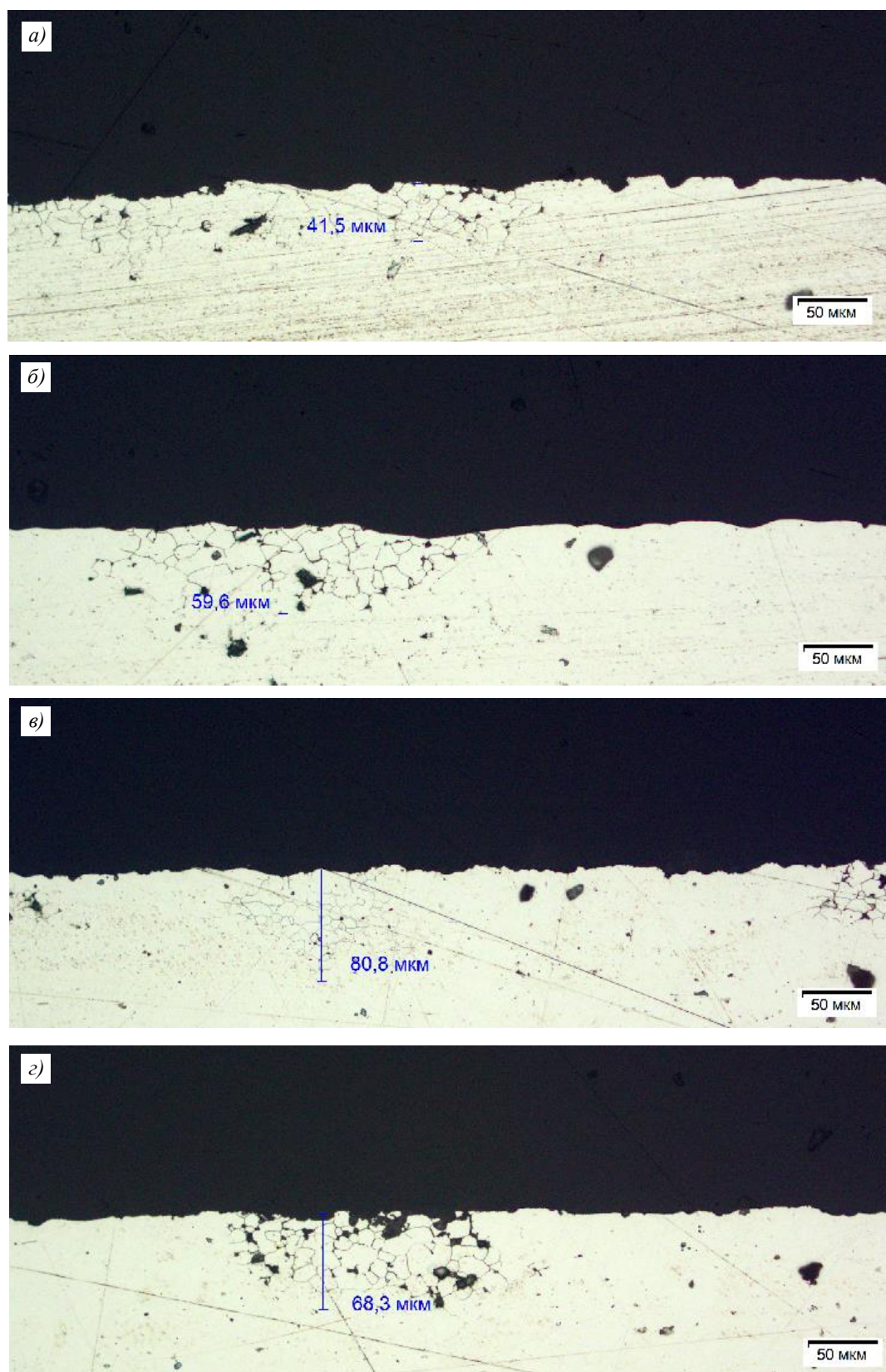


Рис. 1. Типичные изображения отдельных межкристаллитных коррозионных поражений на образцах из алюминиевого сплава 1163-T1 в нулевой точке (а) и после 3 ч хранения в эксикаторе (б), в условиях умеренного климата промышленной атмосферы (в) и в цеховых условиях производства при воздействии остаточной агрессивной атмосферы (г)

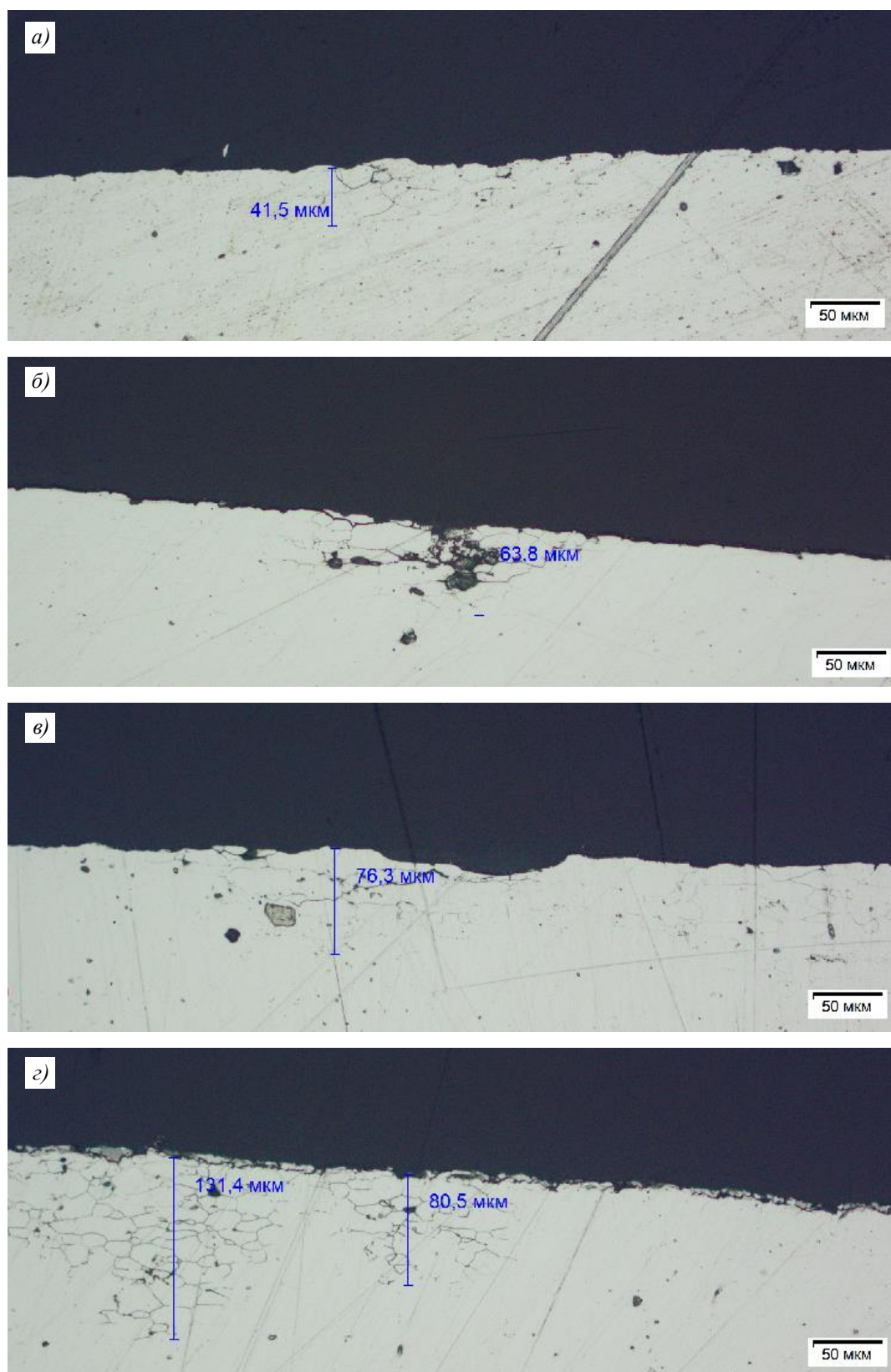


Рис. 2. Типичные изображения отдельных межкристаллитных коррозионных поражений на образцах из алюминиевого сплава 1441-PT1 в нулевой точке (а) и после 3 ч хранения в эксикаторе (б), в условиях умеренного климата промышленной атмосферы (в) и в цеховых условиях производства при воздействии остаточной агрессивной атмосферы (г)

Заключения

Установлена закономерность в изменении результатов испытаний в зависимости от условий и продолжительности хранения. При хранении образцов после операции сушки до 3 ч включительно средняя глубина межкристаллитных коррозионных поражений увеличивается вплоть до 54 % относительно нулевой точки для сплава 1163-T1 и до 93 % – для сплава 1441-PT1. В интервале от 3 до 12 ч рост глубины замедляется до 57 % относительно нулевой точки для сплава 1163-T1 и до 94 % – для сплава 1441-PT1.

Увеличение средней глубины коррозионных поражений, по-видимому, связано с тем, что МКК – это не поверхностный процесс. Трещины от МКК представляют собой узкие капиллярные каналы, уходящие вглубь материала, в которых происходит капиллярное удержание остатков испытательного раствора. Поэтому промывка проточной водой даже под давлением может не полностью очищать коррозионные поражения. Последующая сушка удаляет свободную влагу с поверхности начальных слоев коррозионных поражений, при этом возможна концентрация оставшихся нелетучих компонентов в виде хлоридов, что может локально повышать коррозионную агрессивность и приводить к нежелательному растраву.

Наблюдаемый характер кинетики вторичного коррозионного растрова – активный рост в интервале от 0 до 3 ч с последующим выходом на насыщение – согласуется с гипотезой об ограниченном объеме испытательного раствора, захваченного в капиллярных каналах МКК-трещин. По мере расходования этого объема раствора агрессивные компоненты исчерпываются, и скорость коррозионного процесса снижается до незначительных значений. Примечательно, что при хранении в эксикаторе над силикагелем насыщение также достигается за 3 ч, но общий прирост глубины оказывается наименьшим. Это подтверждает тот факт, что скорость вторичного коррозионного процесса определяется прежде всего количеством остаточного реагента в трещинах, а не поступлением влаги извне, тогда как внешняя влажность и загрязненность атмосферы лишь дополнительно интенсифицируют процесс.

Сравнение двух исследованных сплавов показывает существенное различие в характере их чувствительности к условиям межоперационного хранения. Для сплава 1163-T1 характерен более умеренный прирост средней глубины – от 25 до 57 % относительно нулевой точки в зависимости от условий, тогда как для сплава 1441-PT1 прирост составляет от 24 до 94 %. Более высокая чувствительность сплава 1441-PT1 может быть обусловлена особенностями его микроструктуры: равномерно распределенные мелкодисперсные поражения формируют значительно большую суммарную площадь капиллярных каналов, удерживающих остатки испытательного раствора, что ведет к интенсивному и относительно равномерному вторичному растраву. У сплава 1163-T1, напротив, характерно наличие единичных аномально глубоких поражений при меньшем общем приросте средней глубины, что указывает на локализованный характер вторичной коррозии в зонах наиболее протяженных трещин.

Результаты по максимальной выявленной глубине коррозии не демонстрируют устойчивой корреляции относительно испытанного сплава, условий и продолжительности хранения образцов. Вероятно, оценка МКК только по параметру максимальной глубины является недостаточной для качественной оценки материалов и деталей на склонность к МКК.

Оценка МКК по максимальной и средней глубине может давать противоположные результаты в зависимости от условий и продолжительности хранения, особенно для разных сплавов. Значит, при несовпадении условий испытаний и межоперационных параметров, результаты испытаний, проведенные в различных лабораториях и разными испытателями, могут быть потенциально несопоставимы.

Для исключения расхождений в трактовке результатов при проведении ускоренных испытаний на МКК необходимы единые строгие требования по проведению

испытаний, параметрам операций подготовки и хранения, а также оценка металлографическим методом не только максимальной, но и средней глубины коррозии. Наиболее предпочтительны следующие условия: изготовление микрошлифов должно происходить не позднее чем через 1 ч после операции сушки, они должны храниться в эксикаторе над силикагелем.

Данные выводы рекомендуются для рассмотрения при актуализации нормативной документации по проведению ускоренных испытаний на МКК алюминиевых сплавов.

Список источников

1. 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.
2. Трапезников А.В., Леонов А.А., Власова К.А., Чумакова Е.С. Влияние покрытий на коррозионные свойства алюминиевых сплавов марок АК7ч и ВАЛ10 на образцах с дефектами, устраненными методом газодинамического напыления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). С. 55–65. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-55-65.
3. Cai B., Xu Z., Liu G. et al. Understanding of the occurrence of intergranular corrosion in 2024 aluminum alloy under atmospheric environment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 35. P. 6690–6699.
4. Zhao J., Zhao T., Zhang Y. et al. Corrosion Behavior of the 2024 Aluminum Alloy in the Atmospheric Environment of the South China Sea Islands // *Coatings*. 2024. Vol. 14 (3). P. 331.
5. Chen J., Liu H., Li J. et al. Simultaneously improve hardness and intergranular corrosion resistance for 2024 Al alloy by using ultrasonic shot peening // *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 42. P. 611.
6. Meng Y., Li S., Tian W. Intergranular corrosion of spark plasma sintered 2024 aluminum alloy at different heat treatment states // *Rare Metals*. 2022. Vol. 41. P. 3865–3877.
7. Оглодков М.С., Романенко В.А., Бенариев И., Рудченко А.С., Григорьев М.В. Исследование промышленных полуфабрикатов из перспективных алюминий-литиевых сплавов для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 62–77. DOI: URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77.
8. Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Селиванов А.А., Коваленко А.В., Огурцов П.С., Соловьев В.А. Автоклавное формование обшивок нижней панели крыла из плит сплава 1441 // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). С. 35–44. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-35-44.
9. Шпагин А.С., Баженов А.Р., Антипов К.В., Оглодкова Ю.С. Исследование реологических свойств деформируемого алюминий-литиевого сплава 1441 для компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 3 (80). С. 37–46. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 09.04.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-37-46.
10. Mondou E., Proietti A., Charvillat C. et al. Understanding the mechanisms of intergranular corrosion in 2024 Al alloy at the polycrystal scale // *Corrosion Science*. 2023. Vol. 221. P. 338.
11. Garchani E.F., Kabiri M.R. Intergranular corrosion and mechanical property evolution in AA2024 alloy through heat treatment // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 128. P. 3273–3282.
12. Xiang L., Tao J., Xia X. et al. Impact of Marine Atmospheric Corrosion on the Microstructure and Tensile Properties of 7075 High-Strength Aluminum Alloy // *Materials*. 2023. Vol. 16 (6). P. 2396.
13. Xiao X., Zhou Z., Liu C., Cao L. Microstructure and Its Effect on the Intergranular Corrosion Properties of 2024-T3 Aluminum Alloy // *Crystals*. 2022. Vol. 12 (3). P. 395.
14. Adapala P., Avey T., Yuan Y. et al. Understanding the effect of microstructure and composition on localized corrosion susceptibility of 6xxx aluminum alloys // *Materials Degradation (Nature)*. 2024. Vol. 8. Is. 52. P. 52.
15. Cornejo M., Hentschel T., Koschel D. et al. Intergranular corrosion testing of 6000 aluminum alloys // *Materials and Corrosion*. 2017. Vol. 69. Is. 5. P. 626–633.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V., Chesnokov D.V., Kuttyrev A.E. Application of Al–Mg–Si–Cu system aluminum alloy combined anodic dissolution for prognosis of tensile strength loss during natural exposure testing. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 63–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-63-73.
2. Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Vlasova K.A., Chumakova E.S. Influence of coatings on the corrosion properties of AK7ch and VAL10 aluminum alloys on specimens with defects eliminated by cold spraying. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), pp. 55–65. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 09, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-55-65.
3. Cai B., Xu Z., Liu G. et al. Understanding of the occurrence of intergranular corrosion in 2024 aluminum alloy under atmospheric environment. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, vol. 35, pp. 6690–6699.
4. Zhao J., Zhao T., Zhang Y. et al. Corrosion Behavior of the 2024 Aluminum Alloy in the Atmospheric Environment of the South China Sea Islands. *Coatings*, 2024, vol. 14 (3), p. 331.
5. Chen J., Liu H., Li J. et al. Simultaneously improve hardness and intergranular corrosion resistance for 2024 Al alloy by using ultrasonic shot peening. *Materials Today Communications*, 2025, vol. 42, p. 611.
6. Meng Y., Li S., Tian W. Intergranular corrosion of spark plasma sintered 2024 aluminum alloy at different heat treatment states. *Rare Metals*, 2022, vol. 41, pp. 3865–3877.
7. Oglodkov M.S., Romanenko V.A., Benarieb I., Rudchenko A.S., Grigoryev M.V. Study of industrial semi-finished products from advanced aluminum-lithium alloys for aircraft products. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 62–77. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 09, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-62-77.
8. Serebrennikova N.Yu., Nefedova Yu.N., Selivanov A.A., Kovalenko A.V., Ogurtsov P.S., Soloviev V.A. Autoclave molding of lower wing panel skins from 1441 alloy plates. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), pp. 35–44. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 09, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-35-44.
9. Shpagin A.S., Bazhenov A.R., Antipov K.V., Oglodkova Yu.S. Study of rheological properties of aluminium-lithium alloy 1441 for computer modeling of metal forming processes. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 3 (80), pp. 37–46. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 09, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-3-37-46.
10. Mondou E., Proietti A., Charvillat C. et al. Understanding the mechanisms of intergranular corrosion in 2024 Al alloy at the polycrystal scale. *Corrosion Science*, 2023, vol. 221, p. 338.
11. Garchani E.F., Kabiri M.R. Intergranular corrosion and mechanical property evolution in AA2024 alloy through heat treatment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 128, pp. 3273–3282.
12. Xiang L., Tao J., Xia X. et al. Impact of Marine Atmospheric Corrosion on the Microstructure and Tensile Properties of 7075 High-Strength Aluminum Alloy. *Materials*, 2023, vol. 16 (6), p. 2396.
13. Xiao X., Zhou Z., Liu C., Cao L. Microstructure and Its Effect on the Intergranular Corrosion Properties of 2024-T3 Aluminum Alloy. *Crystals*, 2022, vol. 12 (3), p. 395.
14. Adapala P., Avey T., Yuan Y. et al. Understanding the effect of microstructure and composition on localized corrosion susceptibility of 6xxx aluminum alloys. *Materials Degradation (Nature)*, 2024, vol. 8, is. 52, p. 52.
15. Cornejo M., Hentschel T., Koschel D. et al. Intergranular corrosion testing of 6000 aluminum alloys. *Materials and Corrosion*, 2017, vol. 69, is. 5, pp. 626–633.

Информация об авторах

Морозова Светлана Евгеньевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Волков Илья Александрович, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Кольцова Марина Александровна, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Svetlana E. Morozova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Ilya A. Volkov, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Marina A. Koltsova, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.05.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.05.2026.
 The article was submitted 06.05.2026; approved and accepted for publication after reviewing 08.05.2026.