

УДК 620.1

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-51-57

М.Г. Курс, С.А. Каримова

### НАТУРНО-УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ: ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ КОРРОЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*В качестве натурно-ускоренного метода испытаний предлагается натурная экспозиция образцов в горизонтальном положении под навесом с ежедневным нанесением раствора морской соли.*

*Для отработки методики проведены исследования коррозионных характеристик восьми алюминиевых сплавов различных систем после натурно-ускоренных испытаний в течение 3, 6 и 12 мес.*

*Рассмотрены наиболее часто применяемые методы оценки коррозионных свойств металлических материалов, их достоинства и недостатки. Выявлены методы, обладающие наибольшей чувствительностью к изменению коррозионного состояния материала.*

**Ключевые слова:** коррозия, климатическая стойкость алюминиевых сплавов, натурно-ускоренные испытания, характеристики коррозионной стойкости.

*A daily spraying of a salt solution onto horizontally exposed sheltered specimens is proposed as an outdoor accelerated test.*

*To try-out this methodology, outdoor accelerated tests of corrosion properties of eight aluminum alloys were performed during 3, 6 and 12 months.*

*Pros and cons of the most common testing methods of metal corrosion were considered. Precision of the corrosion testing methods was evaluated.*

**Key words:** corrosion, environmental resistance of aluminum alloys, salt-accelerated outdoor corrosion testing, characterization of corrosion resistance.

Одним из приоритетных стратегических направлений развития материалов и технологий, разработанных в ВИАМ, являются климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах [1].

Натурные климатические испытания незаменимы для оценки реального поведения материалов в условиях эксплуатации. Основным недостатком натурных испытаний – их длительность. Средний срок эксплуатации материалов в изделиях авиационной техники составляет 30–40 лет. Проведение квалификационных испытаний материалов для прогнозирования их поведения при эксплуатации в течение такого времени теряет смысл. Экспозиция в течение 2–3 лет тоже не всегда может выявить слабые места в структуре металла. Для реализации коррозионных процессов в некоторых сплавах необходимо длительное время. Поэтому время, которое отводится для квалификационных испытаний разработанных современных сплавов (2–3 года), не дает полного представления о возможном поведении материала при длительной эксплуатации, особенно во всеклиматических условиях.

При проведении натурно-ускоренных испытаний возможно ускорение коррозионного процесса в 4–5 раз по сравнению с классическими натурными испытаниями без изменения механизма коррозионного разрушения, т. е. уже через год можно спрогнозировать коррозионное состояние сплава

после 5 лет испытаний в открытой атмосфере.

В качестве натурно-ускоренного метода предлагается натурная экспозиция образцов в горизонтальном положении под навесом с ежедневным нанесением раствора морской соли.

К климатическим факторам, оказывающим наибольшее влияние на коррозионное разрушение материалов, относятся температура, влажность и содержание коррозионно-активных компонентов, в частности ионов хлора. При натурно-ускоренных испытаниях ускорение коррозионного процесса достигается главным образом за счет повышения частоты образования фазовой пленки влаги на поверхности образца. Коррозия – это электрохимическая реакция, для протекания которой необходимо наличие электролита, кислорода и электродвижущей силы, возникающей в результате разницы потенциалов между структурными составляющими сплава. Нанесение раствора морской соли обеспечивает условия, необходимые для инициирования и ускорения электрохимического коррозионного процесса.

#### Методика проведения испытаний

Несмотря на большие перспективы по применению в планере самолетов полимерных композиционных материалов (ПКМ), доля металлических материалов остается на уровне 60% [2]. Алюминиевые деформируемые сплавы остаются базовыми конструкционными материалами планера современной и перспективной авиационной техники благодаря удачному комплексу необходимых экс-

плуатационных характеристик [3]. Для отработки методики проведены исследования коррозионных характеристик восьми марок деформируемых алюминиевых сплавов [4, 5] различных систем (листы толщиной ~2 мм со снятой лакировкой) после натурно-ускоренных испытаний в Геленджикском центре климатических испытаний им. Г.В. Акимова (ГЦКИ ВИАМ) в течение 3, 6 и 12 мес.

В результате сравнения полученных характеристик коррозионной стойкости алюминиевых сплавов (потерь механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ ) и глубины межкристаллитной коррозии) установлено, что результаты, полученные после 3-х мес натурно-ускоренных испытаний, совпадают с данными после 2-х лет экспозиции на открытой площадке.

В качестве электролита использовали раствор морской соли в концентрации 5 г/л, полученной из морской воды методом выпаривания, который наносили на образцы с помощью пульверизатора.

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.

#### Оценка коррозионных характеристик алюминиевых сплавов

Часто улучшение одних свойств материала приводит к ухудшению других. Так и с коррозионной защитой: при повышении химической стойкости материала может снизиться механическая прочность изготовленных из него деталей [6]. Для оценки коррозионных свойств металлических материалов применяют различные методы, каждый из которых отражает изменение тех или иных свойств сплава под воздействием окружающей среды. Важной задачей является выбор показателей, чувствительных к процессам коррозии. Широкий спектр показателей коррозионной стойкости приведен в работе [7]. Рассмотрим наиболее часто применяемые методы, их достоинства и недостатки.

#### Оценка изменения механических свойств материала

Механические свойства материала (предел прочности при растяжении, предел текучести, относительное удлинение, модуль упругости, МЦУ, твердость и др.) являются важнейшими характеристиками конструкционного материала. Однако при климатических испытаниях коррозионному воздействию подвергается в основном поверхность образца, при этом глубина коррозионного воздействия по сечению образца часто много меньше его толщины. При испытаниях же на растяжение получаем данные, характеризующие все сечение образца.

Как показывает многолетний опыт климатических испытаний, снижение показателей предела прочности при растяжении для разных сплавов колеблется от 5 до 20% за период экспозиции до 3–5 лет (для листов толщиной 2–3 мм). Предел прочности при растяжении является важной характеристикой конструкционного материала, но на начальных стадиях возникновения и развития коррозии он мало чувствителен к изменению коррозионного состояния образца.

Потери относительного удлинения при климатических испытаниях могут достигать 70–80% от исходных и характеризуются значительными разбросами получаемых значений. Столь значительное падение данной характеристики объясняется ослаблением границ зерен и переходом от внутризеренного к межзеренному разрушению при растяжении, происходящему в результате развивающейся по границам зерен межкристаллитной коррозии (МКК). На рис. 1, а, б представлено макроизображение образцов из алюминиевых сплавов В-1461-Т1 и В96ЦЗп.ч.-Т12 после испытаний при растяжении, на рис. 1, в, г – изображение микроструктур шлифов в месте разрушения, из которых видно, что линия разрыва проходит через коррозионный очаг с межкристаллитной коррозией.

В настоящее время проводятся испытания по оценке возможности применения показателей твердости и микротвердости поверхности как критерия коррозионной стойкости материала. Метод измерения индентационной твердости позволяет определять механические свойства поверхности на основе анализа диаграмм нагружения, что обеспечивает большую точность и высокую автоматизацию измерений. В работах [8, 9] показано, что метод измерения твердости поверхности чувствителен к коррозионным процессам и может быть использован для достоверной количественной оценки интегрального коррозионного состояния алюминиевого сплава.

Одним из достоинств метода натурно-ускоренных испытаний является более равномерное коррозионное разрушение поверхности образца, чем при свободной экспозиции без облива. Таким образом, при изготовлении образцов для определения механических свойств рабочая часть образца всегда проходит через коррозионно-поврежденный участок, даже после небольших сроков экспозиции. Коррозионные поражения на образцах, испытываемых на открытой площадке без облива, как правило, имеют более избирательный характер и меньшую площадь распространения.

#### Скорость коррозии

Скорость коррозии на образцах из алюминиевых сплавов под навесом в среднем в 3 раза больше по сравнению с испытаниями на открытой площадке. При испытаниях с нанесением раствора морской соли скорость коррозии увеличивается до 15–17 раз (рис. 2).

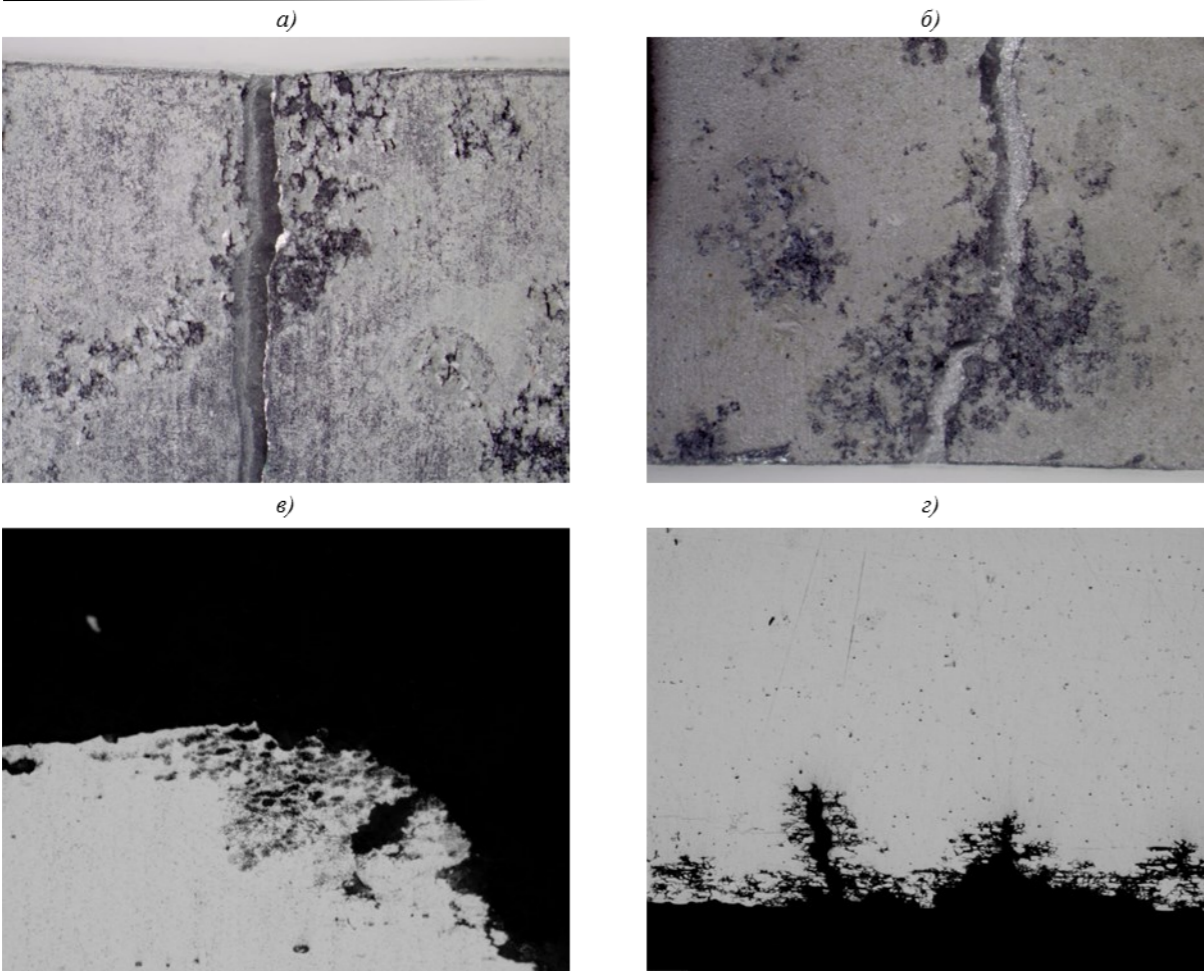


Рис. 1. Макроизображение (а, б – ×10) образцов из алюминиевых сплавов В-1461-Т1 (а), В96Ц3п.ч.-Т12 (б) после испытаний при растяжении и микроструктуры (в, г – ×100) шлифов из сплавов В-1461-Т1 (в), В96Ц3п.ч.-Т12 (г) в месте разрушения

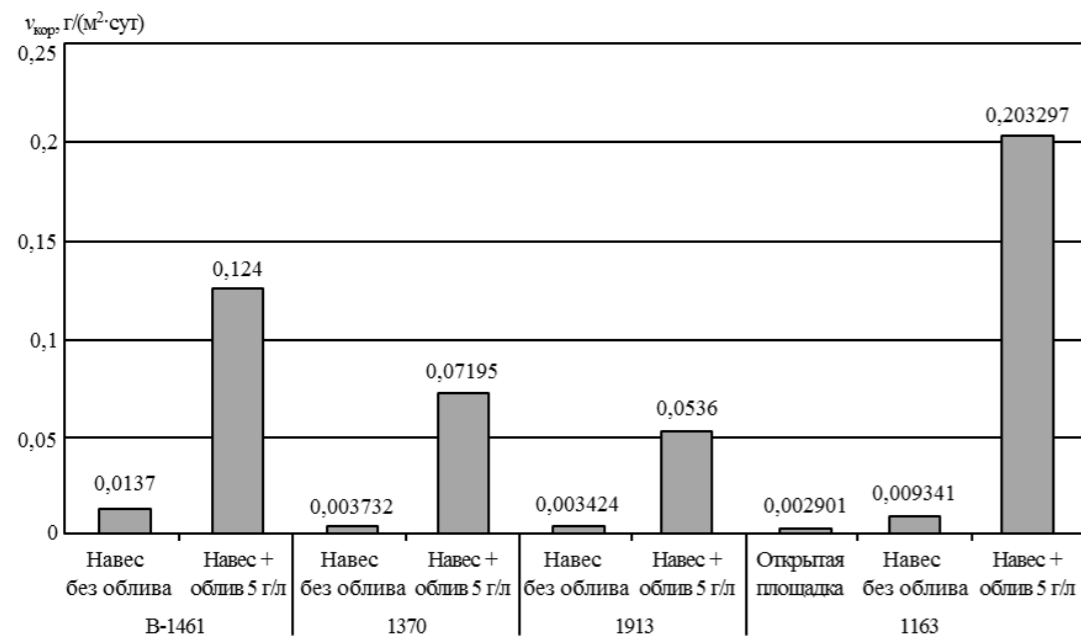


Рис. 2. Скорость коррозии алюминиевых сплавов В-1461-Т1, 1370-Т1, 1913-Т3 и 1163-Т после 3 мес натурно-ускоренных испытаний под навесом

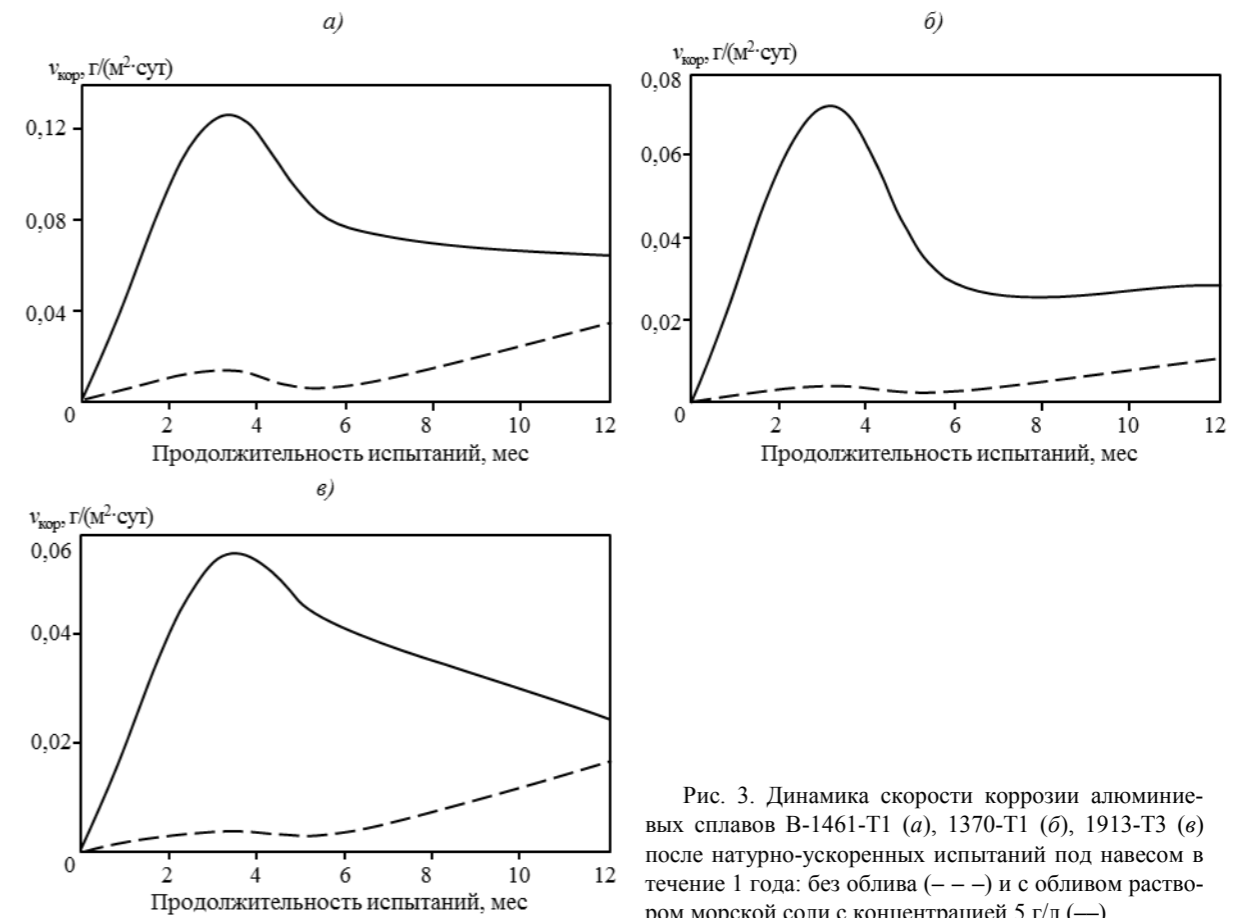


Рис. 3. Динамика скорости коррозии алюминиевых сплавов В-1461-Т1 (а), 1370-Т1 (б), 1913-Т3 (в) после натурно-ускоренных испытаний под навесом в течение 1 года: без облива (---) и с обливом раствором морской соли с концентрацией 5 г/л (—)

Метеопараметры атмосферы ГЦКИ (г. Геленджик) за период экспозиции образцов

Период испытаний	Температура воздуха, °С (среднее значение)	Относительная влажность воздуха, % (среднее значение)	Продолжительность увлажнения поверхности, ч, при фактической температуре		Количество выпадения хлоридов на единицу площади, мг/(м²·сут), по методу «сухое полотно» / «влажная свеча»	
			на открытой атмосферной площадке	в жалюзийной будке	«сухое полотно»	«влажная свеча»
I (май–июль)	22	84	324	1517	21,4	32,6
II (август–ноябрь)	19,8	70	570	1116	45,1	57,9
III (ноябрь–апрель)	5,5	76	1701	2753	213,3	1414,4

На рис. 3 представлена динамика изменения скорости коррозии на образцах из алюминиевых сплавов в процессе натурно-ускоренных испытаний (съемы проводились через 3, 6 и 12 мес). В работе [10] приведена оценка зависимости скорости коррозии от площади коррозионных поражений на образцах при испытаниях натурно-ускоренным методом.

Как видно из рисунков, характер изменения скорости коррозии для трех сплавов примерно одинаков. В результате анализа метеопараметров атмосферы за период экспозиции образцов выявлено, что наибольшее влияние на динамику развития скорости коррозии на образцах, экспонировавшихся без облива, оказывали такие параметры поверхности и количество выпадения хлоридов: для всех сплавов скорость коррозии значительно

увеличилась за III период экспозиции, т. е. в период максимальной продолжительности увлажнения поверхности и максимального количества осажденных на поверхность хлоридов (см. таблицу). На скорость коррозии образцов, экспонировавшихся с нанесением раствора морской соли, влияние метеопараметров атмосферы выражено менее сильно: скорость коррозии достигает максимальных значений уже в течение первых трех месяцев и далее снижается. Для определения же максимальной скорости коррозии сплава в условиях натурной экспозиции без нанесения раствора соли требуются более длительные испытания.

Склонность к межкристаллитной коррозии

Характер и рост межкристаллитной коррозии (МКК) в отличие от скорости коррозии более индивидуальны для каждого сплава. Так, для сплава

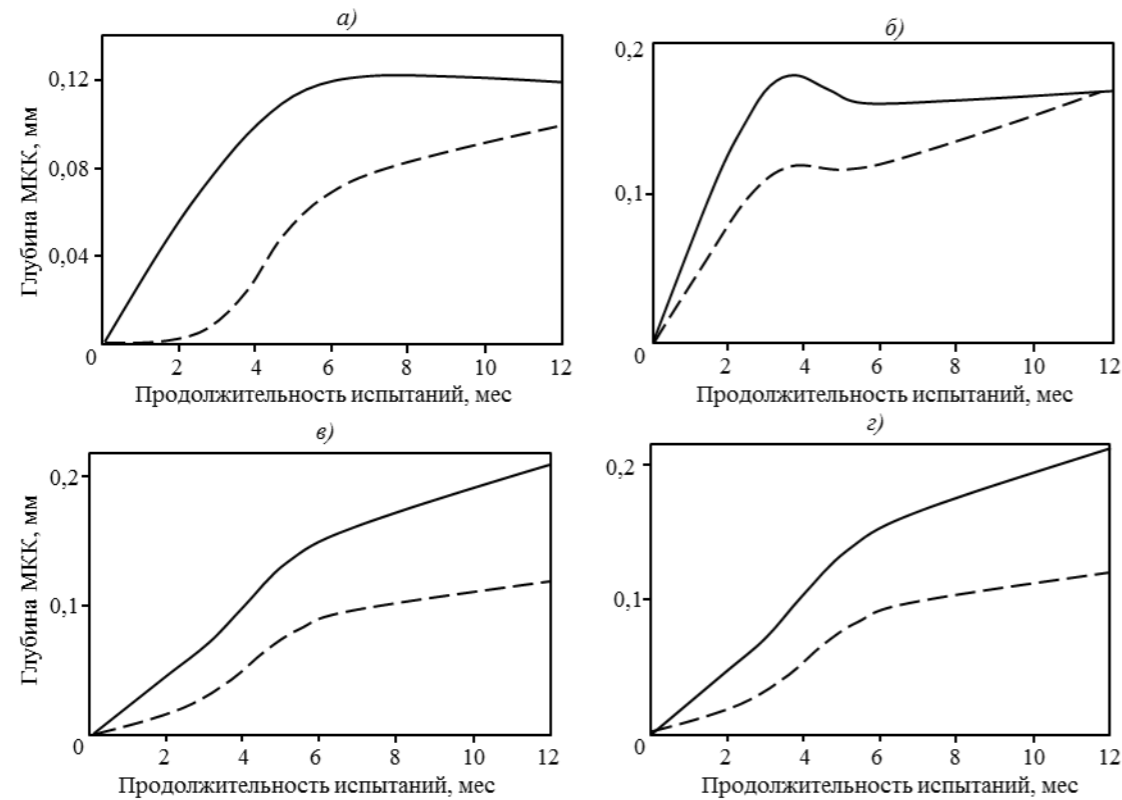


Рис. 4. Глубина МКК алюминиевых сплавов В-1341-Т1 (а) В-1469-Т1 (б), 1370-Т1 (е), В96ЦЗп.ч.-Т12 (з) в процессе натурно-ускоренных испытаний: без облива (---) и с обливом раствором морской соли с концентрацией 5 г/л (—)

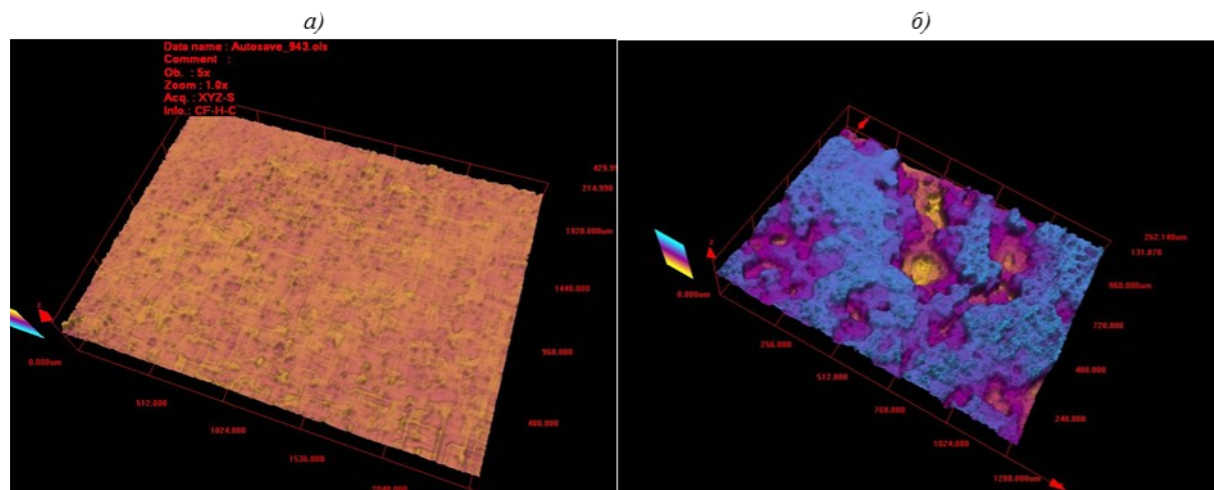


Рис. 5. Участок поверхности (а, б – ×100) листа сплава 1913-Т3 в исходном (а) и после 1 года испытаний с нанесением морской соли (б)

вов В-1341-Т1 и В-1469-Т1 после 1 года натурно-ускоренных испытаний наблюдается торможение роста глубины МКК, а для сплавов В96ЦЗп.ч.-Т12 и 1370-Т1 – характерно увеличение МКК с увеличением продолжительности экспозиции (рис. 4).

При натурно-ускоренных испытаниях оценить максимально возможную глубину МКК сплава можно за гораздо более короткий срок по сравнению с натурными испытаниями.

Торможение роста глубины МКК связано с затруднением протекания электрохимического растворения по границам зерен по мере удаления от поверхности в глубь образца. При этом максимальная глубина, которой может достичь МКК для конкретного сплава, зависит от стабильности и однородности его структуры по сечению, а также от характера распада пересыщенного твердого раствора и выделений по границам зерен [11].

**Склонность к питтинговой коррозии**

Алюминиевые сплавы склонны к питтинговой коррозии, которая может достигать значительной глубины и являться концентратором напряжений при приложении нагрузки к образцу (рис. 5).

В работе [12] приводятся результаты исследований, которые показывают, что при испытаниях в камере солевого тумана (КСТ) на сплавах, подверженных питтинговой коррозии, наблюдается наибольшая седиментация хлоридов и, соответственно, максимальные коррозионные потери, а на сплавах с равномерной коррозией – меньшая седиментация хлоридов и минимальные коррозионные потери.

Действительно, проанализировав результаты, полученные после натурно-ускоренных испытаний, и расположив сплавы в порядке увеличения глубины питтинга (рис. 6), можно распределить их по 4 группам:

Сплав	Глубина питтинга, мкм
1424-Т1	<50
В-1341-Т1, 1370-Т1	50–100
В-1461-Т1, В-1469-Т1, 1441-Т1	100–150
В96ЦЗп.ч.-Т12, 1913-Т3	>150

Объединив все полученные результаты по коррозионной стойкости алюминиевых сплавов, можно сделать вывод о некоторой корреляции данных с глубиной питтинга. Особенно ярко это выражено для сплавов:

- 1424-Т1, показавшим себя по совокупности свойств наиболее коррозионностойким;
- В96ЦЗп.ч.-Т12, характеризующимся наибольшими коррозионными потерями.

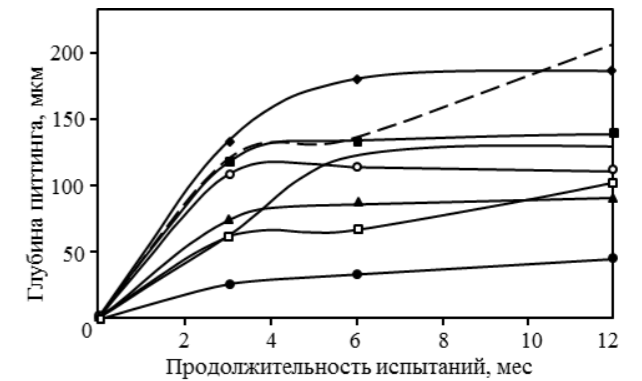


Рис. 6. Глубина питтинга алюминиевых сплавов в процессе натурно-ускоренных испытаний с нанесением раствора морской соли концентрацией 5 г/л: 1424 (●), В-1469 (—), В-1461 (■), 1441 (○), В-1341 (▲), 1370 (□), 1913 (---), В96ЦЗп.ч. (◆)

После 6 мес натурно-ускоренных испытаний глубина питтинга для большинства сплавов достигает максимума и далее изменяется незначительно.

Таким образом, разработан метод натурно-ускоренных испытаний, который позволяет получать данные по коррозионной стойкости алюминиевых сплавов в 4–5 раз быстрее (по сравнению с классическими испытаниями на открытой площадке) без изменения механизма коррозионного разрушения.

К наиболее чувствительным характеристикам изменения коррозионного состояния металлических материалов можно отнести скорость коррозии, изменение твердости поверхности, глубину питтинга и МКК. Механические свойства ( $\sigma_B, \sigma_{0,2}$ ) менее чувствительны к увеличению агрессивности коррозионного воздействия.

Динамика изменения скорости коррозии при натурно-ускоренных испытаниях имеет общий характер для всех сплавов, в то время как глубина межкристаллитной коррозии изменяется сугубо индивидуально для каждого сплава.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
3. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
4. Авиационные материалы: Справочник. Т. 4. Ч. 1. Деформируемые алюминиевые сплавы. Кн. 1. /Под общ. ред. акад. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2008. 263 с.
5. Авиационные материалы: Справочник. Т. 4. Ч. 1. Деформируемые алюминиевые сплавы. Кн. 2. /Под общ. ред. акад. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2009. 172 с.
6. Каримова С.А. Коррозия – главный враг авиации //Наука и жизнь. 2007. №6. С. 63–66.
7. ГОСТ 9.908–85 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.
8. 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.
9. Тихонов В.Б., Старцев О.В., Курс М.Г. Оценка степени коррозионного поражения поверхности алюминиевых сплавов с помощью микротвердости /В сб. докл. IX Международной науч. конф. «Гидроавиасалон-2012». М. 2012. С. 180.
10. Курс М.Г., Каримова С.А., Махсидов В.В. Сравнение коррозионной стойкости деформируемых алюминиевых сплавов при натуральных и натурно-ускоренных испытаниях //Вопросы материаловедения. 2013. №1(73). С. 182–190.
11. Махсидов В.В., Колобнев Н.И., Каримова С.А., Сбитнева С.В. Взаимосвязь структуры и коррозионной стойкости в сплаве 1370 системы Al–Mg–Si–Cu–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 8–13.
12. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 18–22.