

УДК 620.193:669.715

*М.Г. Курс¹, А.Е. Кутырев¹, М.А. Фомина¹***ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ
ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ
ПРИ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10

При паспортизации алюминиевых сплавов обязательным является исследование их склонности к локальным видам коррозии, определяемым в лабораторных условиях, а также коррозионной стойкости, определяемой в процессе натурной экспозиции. Стандартные климатические испытания алюминиевых сплавов проводятся в условиях открытых площадок. Показано, что испытания под навесом являются более показательными для данного класса материалов, так как обеспечивают усиление контролирующих факторов коррозионного процесса – продолжительности увлажнения поверхности и увеличения количества хлоридов. Освещены проблемы корреляции лабораторных и натурных коррозионных испытаний и приведена методика натурно-ускоренных испытаний, позволяющая сократить сроки климатических испытаний в 4–5 раз по сравнению с экспозицией в натурных условиях.

Ключевые слова: *коррозия, алюминиевые сплавы, натурные и лабораторные коррозионные испытания.*

By certification of aluminium alloys the investigation of their liability to isolated types of corrosion determined in laboratory conditions is obligatory as well as investigation of corrosion resistance of materials determined in the course of full-scale exposition. Regularly environmental tests of aluminium alloys are carried out under the conditions of open areas. This paper shows that investigations under the roof are more significant for the given class of materials as they provide amplification of monitoring factors of corrosive process – damping duration of the surface and expansion in the number of chlorides. Also this paper throws light on correlation problems of laboratory and full-scale corrosion testing and presents the procedure of full-scale accelerated tests allowing to reduce the time of environmental tests by 4–5 times in comparison with the exposition under full-scale conditions.

Keywords: *corrosion, aluminum alloys, full-scale and laboratory corrosion testing.*

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

Создание изделий авиационной техники (АТ) в значительной степени зависит от эксплуатационной надежности применяемых в конструкциях материалов, поэтому проведение климатических испытаний алюминиевых сплавов с комплексной оценкой изменения свойств для обеспечения безопасности эксплуатации изделий АТ является приоритетной задачей современного материаловедения [1].

Современные требования к качеству изделий поставили перед разработчиками материалов задачу по длительному обеспечению сохранения высоких значений характеристик надежности и долговечности для улучшения эксплуатационных и экономических показателей конструкции. Обеспечение надежности и увеличение ресурса самолетной конструкции тесно связано с применением эффективных мер защиты от корро-

зии ее агрегатов и узлов. Однако в реальных условиях эксплуатации полностью предотвратить появление коррозионных повреждений не представляется возможным. Поэтому оценка влияния каждого конкретного вида коррозии на работоспособность сплава является актуальной и важной задачей.

Исследования коррозионной стойкости позволяют выявить склонность сплавов к опасным видам коррозионного разрушения на этапе разработки материала с тем, чтобы с помощью корректировки химического состава и режимов термической обработки достичь оптимального уровня механических свойств в сочетании с удовлетворительной коррозионной стойкостью. Поэтому перед разработчиком материала стоит сложная задача нахождения компромисса, так как при повышении механических характеристик, как правило, происходит ухудшение коррозионных свойств, и наоборот, повышение сопротивляемости коррозии приводит к снижению показателей прочности.

Ресурс конструкции, зависящий от многих параметров, во многом определяется фактором воздействия коррозионной среды. Выполнить в полной мере требования по защите авиационной конструкции от коррозионного воздействия практически невозможно. Поскольку антикоррозионное покрытие не является абсолютной защитой, возможно повреждение этой защиты, и, наконец, в безопасно-повреждаемой конструкции допускается наличие усталостных трещин, поверхности которых не имеют антикоррозионной защиты [2].

На каждый класс материалов – от металлических до неметаллических – в процессе климатических испытаний превалирующее действие оказывают определенные факторы атмосферы. Поэтому, также как при лабораторных испытаниях, когда выявление склонности к локальным видам коррозии проводится с помощью соответствующих реагентов, при натурных испытаниях для корректной оценки коррозионной сопротивляемости необходимо проводить испытания в тех условиях, при которых воздействие агрессивных параметров на данный материал максимально.

В данной работе приведены результаты исследования коррозионной стойкости листов из деформируемых алюминиевых сплавов марок В-1341-Т1, В96ЦЗп.ч.-Т12, В-1461-Т1 и В-1469-Т1 при испытаниях лабораторными, натурными и натурно-ускоренными методами; проведено сопоставление результатов; рассмотрены особенности коррозионного разрушения. Определены факторы, в наибольшей степени оказывающие влияние на скорость коррозии алюминиевых сплавов; даны рекомендации по условиям и срокам экспозиции в натурных условиях для выявления наиболее опасных видов коррозии.

Методы испытаний

Лабораторные испытания

Лабораторные методы оценки коррозионной стойкости алюминиевых сплавов широко используются при разработке новых сплавов и оптимальных режимов термической/механической обработки.

Первопричиной коррозии металлов, в том числе и электрохимической, является их термодинамическая неустойчивость. При взаимодействии с электролитами металлы самопроизвольно растворяются, переходя в более устойчивое окисленное (ионное) состояние [3]. Лабораторные испытания материалов сводятся к выдержке в соответствующих растворах, составы которых никогда не встретятся при реальной эксплуатации сплава. Основная цель лабораторных методов исследований – выявление теоретической возможности возникновения того или иного вида коррозии.

Лабораторные испытания позволяют в сравнительно небольшой срок оценить склонность сплава к тому или иному локальному виду коррозии: глубину межкристаллитной коррозии, скорости коррозии, величину максимально допустимых напряжений

при испытаниях на коррозионное растрескивание, степень расслаивающей коррозии [4–7].

Такие испытания являются обязательными при паспортизации материала и незаменимы при разработке сплава, когда оптимизацией состава и режима термообработки можно достичь требуемого уровня коррозионных характеристик. Однако определенная при лабораторных условиях склонность, например, к межкристаллитной коррозии (МКК), в условиях натуральных испытаний может либо превысить данные лабораторных исследований, либо не успеть реализоваться вовсе (рис. 1). Видно, что глубина МКК после лабораторных испытаний больше по сравнению с глубиной МКК после натуральных испытаний для сплавов В96ЦЗп.ч. и В-1341, меньше – для сплавов В-1461, 1441, 1370.

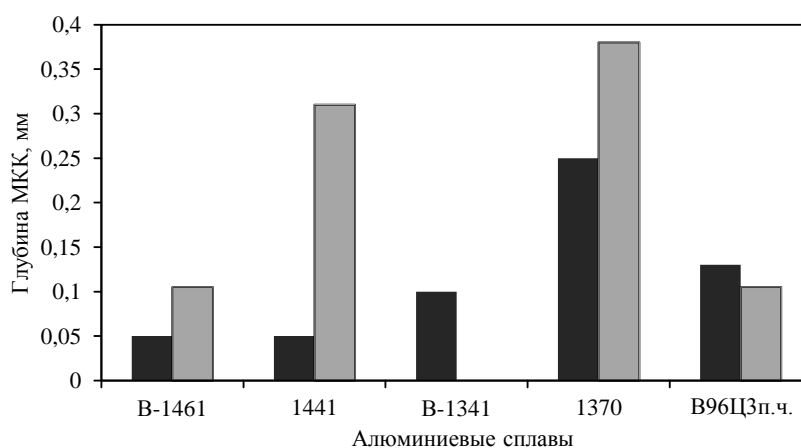


Рис. 1. Глубина МКК образцов из алюминиевых сплавов после лабораторных испытаний (■) и после 1 года экспозиции на открытой площадке ГЦКИ (■)

Таким образом, главный недостаток лабораторных испытаний – отсутствие корреляции с натурными, что также подтверждено зарубежным источником [8].

В данной работе проведены испытания на склонность к локальным видам коррозии по ГОСТ 9.021–74, ГОСТ 9.913–90, ГОСТ 9.019–74, ГОСТ 9.904–82, а также испытания образцов в камере солевого тумана (ГОСТ 9.913–90) в течение 1; 2 и 3 мес.

Натурные испытания

Проведение климатических испытаний для обеспечения безопасности и защиты от коррозии в настоящее время относится к приоритетным стратегическим направлениям развития материалов и технологий [1, 9]. Без данных по климатической стойкости невозможно оценить поведение материала в реальных климатических условиях. Однако для получения достоверной оценки по климатической стойкости необходимо проведение длительных испытаний – до 10–15 лет, что при паспортизации сплавов является редко реализуемым. Например, по стандарту ASTM G112, который регламентирует метод испытаний на расслаивающую коррозию, предусмотрено увеличение сроков экспозиции до 7–9 лет для сплавов, стойких к расслаивающей коррозии (РСК).

В работе [10] приведены данные по длительной экспозиции алюминиевых сплавов в условиях морского субтропического климата и показано, что влияние климатических факторов на прочностные характеристики начинает проявляться только после 5 лет экспозиции (рис. 2).

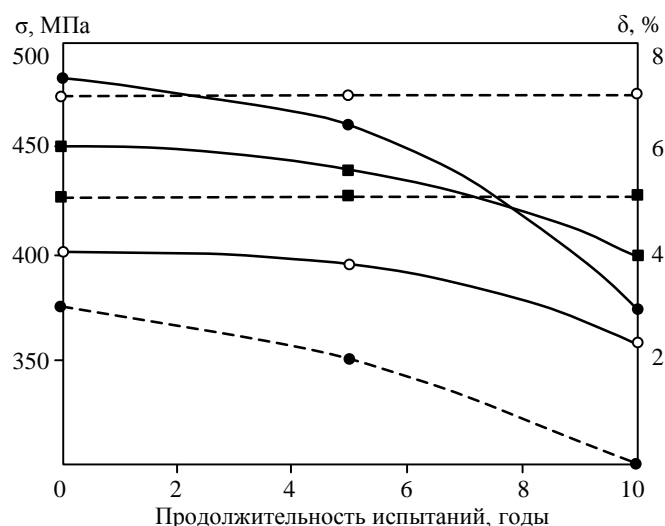


Рис. 2. Изменение предела прочности (—) и относительного удлинения (- - -) образцов поковок сплава В93п.ч. в состоянии Т1 (●), Т2 (■) и Т3 (○) при экспозиции в морском субтропическом климате

Конечно, материалы не применяются в конструкциях без соответствующих средств защиты, лакировки и всевозможных покрытий. Однако для получения надежной конструкции необходимо применять материалы, которые способны противостоять внешним воздействиям и сохранять свои характеристики в процессе длительной эксплуатации.

В данной работе проведены испытания образцов из алюминиевых сплавов на открытой площадке ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова [11] с умеренно теплым климатом, который характеризуется повышенным содержанием хлоридов в атмосфере, — на атмосферном стенде под углом 45 град (срок экспозиции составил 1; 2 и 3 года) по ГОСТ 9.909–86 и под навесом на стенде в горизонтальном положении (срок экспозиции составил 3 и 6 мес, 1; 2 и 4 года).

Различие в экспозиции указанными методами состоит в том, что при испытаниях на открытой площадке продолжительность увлажнения поверхности образцов минимальна ввиду высокой степени воздействия солнечной радиации. Расположение образцов под углом к горизонту способствует стеканию пленки электролита, образующейся при конденсации влаги, и смыву хлоридов осадками.

Натурно-ускоренные испытания

Исследованиям коррозионной стойкости материалов при испытаниях натурно-ускоренными методами посвящен ряд работ [12–16]. Натурно-ускоренные испытания позволяют значительно сократить срок испытаний алюминиевых сплавов в атмосфере и получить характеристики коррозионной стойкости в 4–5 раз быстрее по сравнению с классическими испытаниями на открытой площадке.

Общее правило, которым следует руководствоваться при выборе метода ускоренного испытания, состоит в том, что необходимо влиять на тот фактор, который является контролирующим. При этом не следует чрезмерно ускорять процессы коррозии, так как сильное сокращение продолжительности испытания за счет чрезмерной агрессивности среды часто приводит к изменению характера продуктов коррозии и их распределения по поверхности, изменяются также защитные свойства пленок и интенсивность коррозии [17].

К климатическим факторам, оказывающим наибольшее влияние на коррозионное разрушение металлических материалов, относятся температура, влажность и содержание коррозионно-активных компонентов, в частности ионов хлора. При натурно-

ускоренных испытаниях ускорение коррозионного процесса достигается главным образом из-за повышения частоты образования фазовой пленки влаги электролита на поверхности образца.

В данной работе натурно-ускоренные испытания проведены в ГЦКИ ВИАМ под навесом на стенде в горизонтальном положении как без облива, так и с обливом раствором морской соли с концентрацией 5 г/л. Облив осуществляли методом распыления мелкодисперсного раствора морской соли с помощью пульверизатора 1 раз в день в вечернее время; срок экспозиции составил 3 и 6 мес, 1; 2 и 4 года.

Материалы для испытаний

Для испытаний использовали листы деформируемых алюминиевых сплавов В-1341-Т1, В96ЦЗп.ч.-Т12, В-1461-Т1, В-1469-Т1 (табл. 1) без защитных покрытий, с предварительно удаленной плакировкой. Данные сплавы рекомендуются к применению в широкой номенклатуре изделий авиационной техники – от элементов обшивки до силового набора, а также в изделиях автомобильной промышленности, гидроавиационного назначения и др. [18–22].

Таблица 1

Характеристика полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, использовавшихся для проведения испытаний

Сплав	Толщина листа, мм	Система
В-1461-Т1	2,0	Al–2,8Cu–Li
В-1341-Т1	1,5	Al–0,7Mg–Si
В96ЦЗп.ч.-Т12	1,8	Al–4,5Zn–2,3Mg–2Cu
В-1469-Т1	2,4	Al–1,8Cu–Li–Mg

Результаты и обсуждение

Оценка скорости коррозии

При коррозионных испытаниях снижение скорости коррозии со временем в большинстве случаев обуславливается образованием слоя продуктов коррозии на поверхности образца, который препятствует доступу активной среды к поверхности металла [3]. Проведенные испытания показали, что скорость коррозии растет до момента достижения площади коррозионных поражений 90–100% поверхности (при испытаниях под навесом с обливом – до 3 мес, под навесом без облива – до 1 года) и далее снижается или изменяется незначительно. При испытаниях в КСТ скорость коррозии для всех испытуемых сплавов планомерно снижается по мере увеличения продолжительности испытаний независимо от площади коррозионных поражений (рис. 3). При испытаниях в натуральных условиях без дополнительного воздействия коррозионно-активными компонентами характерно влияние метеопараметров атмосферы на характер кривой скорости коррозии – в частности, продолжительности увлажнения поверхности и количества выпадения хлоридов (рис. 4), что отмечено ранее в работе [23].

При испытаниях в КСТ значительно меняется агрессивность среды, воздействующая на поверхность алюминиевого сплава. На поверхности образца всегда присутствует фазовая пленка влаги, в которой при этом содержится значительное количество хлорид-ионов. Это приводит к существованию единого для всей поверхности значения потенциала коррозии алюминиевого сплава, который будет иметь более положительное значение, чем при естественных условиях. Как известно, при атмосферной коррозии металлов имеет место анодно-катодно-омический контроль, в отличие от коррозии металлов в воде с кислородной деполяризацией, для которой характерен катодный контроль [3].

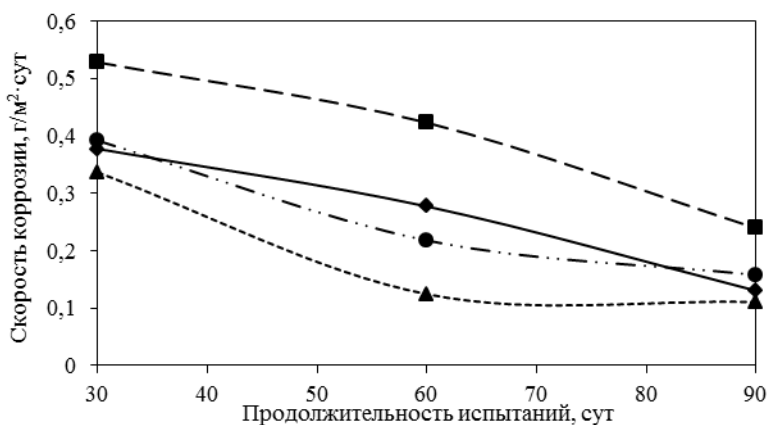


Рис. 3. Скорость коррозии после экспозиции в КСТ образцов из алюминиевых сплавов В-1469-Т1 (◆); В-1341-Т1 (●); В96ЦЗп.ч.-Т12 (■); В-1461-Т1 (▲)

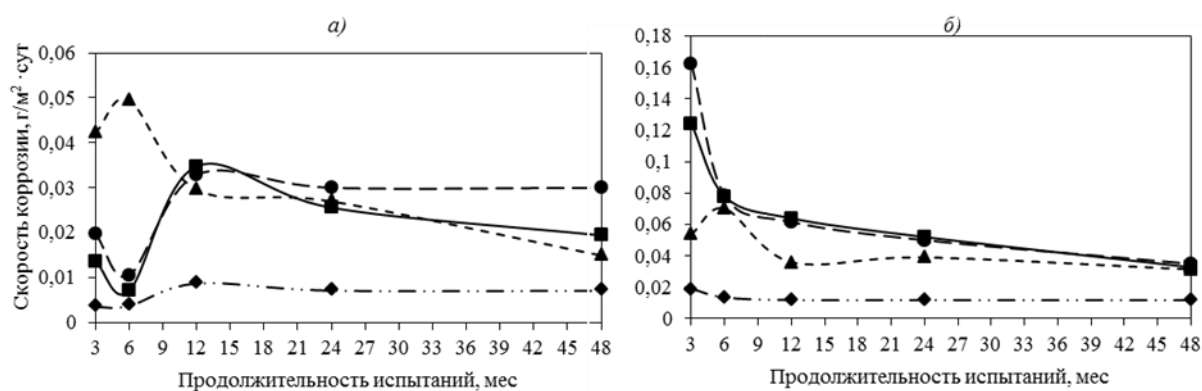


Рис. 4. Скорость коррозии после испытаний под навесом без облива (а) и с обливом (б) образцов из алюминиевых сплавов В-1469 (▲); В-1341 (◆); В96ЦЗп.ч. (●); В-1461 (■)

Сдвиг потенциала коррозии в положительную сторону изменяет морфологию коррозионного поражения поверхности алюминиевого сплава из-за увеличения плотности расположения питтингов. Это наглядно видно при анодном растворении алюминиевого сплава в хлоридных растворах – при значительном отклонении потенциала анодного растворения от потенциала коррозии (200÷300 мВ), коррозия алюминиевого сплава переходит в язвенную. Это происходит вследствие неоднородности пассивной пленки, образующейся на поверхности алюминиевого сплава. Возможность возникновения питтингового пробоя участка поверхности алюминиевого сплава обуславливается соотношением между потенциалом коррозии и величиной питтингового пробоя. При этом последняя величина различна для разных участков поверхности. Экспериментально это можно наблюдать при снятии поляризационных кривых в микроячейке [24]. Образование более положительного потенциала коррозии алюминиевого сплава в КСТ приводит к увеличению количества мест питтинговых пробоев по сравнению с условиями атмосферной коррозии и, соответственно, к изменению морфологии коррозии.

Оценка склонности сплавов к МКК и РСК

Причиной склонности алюминиевых сплавов к МКК чаще всего являются структурные изменения на границах зерен, которые превращают эту узкую зону в малополяризующийся анод, который и подвергается усиленному коррозионному разрушению [2]. Торможение роста глубины МКК с продолжительностью испытаний связано с за-

труднением протекания электрохимического растворения по границам зерен по мере удаления от поверхности вглубь образца. При этом максимальная глубина, которой может достичь МКК для конкретного сплава, зависит от степени равновесности его структуры и от разницы потенциалов между структурными составляющими сплава.

Для большинства сплавов результаты лабораторных испытаний по глубине МКК эквивалентны 1 году испытаний под навесом или 3 мес испытаний под навесом с обливом (табл. 2). При сравнении данных лабораторных испытаний с результатами экспозиции на открытой площадке (ОП) установлено, что для сплавов В-1341-Т1 и В96ЦЗп.ч.-Т12 и за 3 года не реализуется глубина МКК, полученная при испытаниях в растворе, а выявленная лабораторным методом глубина МКК для сплава В-1461-Т1 значительно меньше результатов 1 года экспозиции на ОП. Наименьшая склонность к МКК – у сплава В-1341-Т1. При испытаниях под навесом рост глубины МКК значительно сокращается после 1–2 лет, при натурно-ускоренных испытаниях – после 6–12 мес.

Таблица 2

**Сопоставление результатов натурных, натурно-ускоренных
и лабораторных испытаний на склонность сплавов к МКК и РСК**

Условия испытаний	Срок испытаний	Значения свойств для сплавов марок			
		В-1469-Т1	В-1341-Т1	В96ЦЗп.ч.-Т12	В-1461-Т1
Глубина МКК, мм					
По ГОСТ 9.021–74		0,15	0,1	0,13	0,03
КСТ	3 мес	0,1	Отсутствует		0,04
Открытая площадка	1 год	–	0	0,105	0,105
	2 года	–	0,049	0,105	0,105
	3 года	–	0,07	0,105	0,105
Под навесом	3 мес	0,11	0,01	0,03	0,05
	6 мес	0,12	0,07	0,09	0,03*
	1 год	0,17*	0,1*	0,12*	0,08
	2 года	0,17	0,16	0,18	0,08
	4 года	0,17	0,16	0,18	0,11
То же при ежедневном обливе	3 мес	0,16*	0,08*	0,07	0,1*
	6 мес	0,17	0,12	0,15*	0,1
	1 год	0,17	0,12	0,21	0,2
	2 года	0,18	0,14	0,22	0,2
	4 года	0,19	0,14	0,22	0,2
РСК, балл					
По ГОСТ 9.904–82		3	6	4–5	2–3
КСТ	3 мес	2	2	2	2
Открытая площадка	3 года	2	2	2	2
Под навесом	4 года	3	6; 3 (2,5 года)	2	2
То же при ежедневном обливе	4 года	3	6; 3 (2,5 года)	8; 5 (2 года)	2

* Значения МКК после натурно-ускоренных испытаний, наиболее близкие к результатам лабораторных испытаний.

Таким образом, результаты лабораторных исследований склонности алюминиевых сплавов к МКК в первом приближении могут спрогнозировать поведение материала в условиях натурной экспозиции под навесом, но получить достоверную информацию о максимально возможной глубине МКК для каждого сплава можно только на основе результатов натуральных испытаний.

Особая опасность РСК состоит в том, что данный вид коррозии не тормозится во времени и приводит к быстрой потере прочности материала и несущей способности конструкции. Сравнение результатов по оценке расслаивающей коррозии показало, что в процессе натурной экспозиции не удается выявить склонность к РСК в течение 3 мес испытаний в КСТ, 3 лет испытаний на ОП или 4 лет экспозиции под навесом. При испытаниях под навесом с обливом РСК для сплава В96ЦЗп.ч.-Т12 выявлена после 2 лет экспозиции. Таким образом, для оценки склонности алюминиевых сплавов к РСК необходимы более длительные испытания в натуральных условиях (не менее 5–7 лет) либо проведение натурно-ускоренных испытаний.

Оценка изменения механических свойств материалов

После коррозионных испытаний проведены стандартные испытания на осевое растяжение при 20°C (по ГОСТ 1497–84), а также испытания на малоцикловую усталость (МЦУ) при температуре 20°C, коэффициенте асимметрии цикла $R=0,1$ и частоте $f=35$ Гц (по ГОСТ 25.502–79).

Таблица 3

Потери механических свойств (σ_b – предел прочности при растяжении; δ – удлинение при растяжении) образцов из алюминиевых сплавов после натуральных испытаний

Сплав	Срок испытаний, год	Потери механических свойств, %, при экспозиции					
		на открытой площадке		под навесом		под навесом+облив*	
		σ_b	δ	σ_b	δ	σ_b	δ
В-1341-Т1	1	0	27,4	11,3	27,9	12,6	50,0
	2	0	29,4	9,0	29,4	13,1	72,1
	3	0	32,1	–	–	–	–
	4	–	–	13,9	58,8	14,2	73,2
В96ЦЗп.ч.-Т12	1	0	60,0	10,7	7,3	12,7	85,4
	2	0	61,8	5,1	3,3	12,1	89,4
	3	3,9	65,0	–	–	–	–
	4	–	–	7,1	86,2	10,9	92,5
В-1461-Т1	1	2,8	41,6	5,6	35,5	12,2	43,1
	2	0,9	38,1	3,7	4,6	5,0	11,9
	3	0	39,0	–	–	–	–
	4	–	–	11,7	28,3	10,1	45,1
В-1469-Т1	1	–	–	3,0	1,2	6,1	16,5
	2	–	–	4,2	37,6	8,4	43,1
	4	–	–	5,8	42,4	13,5	64,7

* Раствор морской соли с концентрацией 5 г/л.

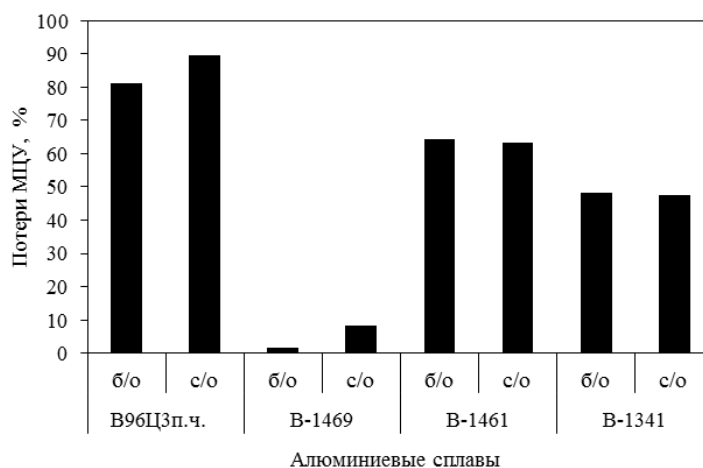


Рис. 5. Потери МЦУ образцов из алюминиевых сплавов после 1 года испытаний под навесом с обливом раствором морской соли с концентрацией 5 г/л (с/о) и без облива (б/о)

В процессе коррозионных испытаний наибольшее влияние коррозионные поражения оказывают на падение пластических свойств и характеристик долговечности, в то время как потери прочности не превышают 15% при самых жестких условиях испытаний (табл. 3, рис. 5). Так, наибольшие потери прочностных свойств и характеристик долговечности выявлены для сплава В96ЦЗп.ч.-Т12, проявившего наибольшую склонность к РСК и МКК.

Выводы

1. Разработана методика проведения натурно-ускоренных испытаний в условиях умеренно теплого климата (ГЦКИ) при горизонтальном расположении образцов на атмосферном стенде под навесом, позволяющая при ускорении коррозионного процесса в ~4 раза получать данные, в полной мере характеризующие уровень коррозионного разрушения алюминиевых сплавов при воздействии климатических факторов.

2. Показано, что для алюминиевых сплавов при испытаниях в натуральных условиях интенсификации процесса коррозионного разрушения способствует увеличение продолжительности увлажнения поверхности и количества хлоридов, что соответствует условиям испытаний под навесом. При этом дополнительное повышение поверхностной концентрации хлоридов позволяет значительно сократить время до реализации всех коррозионных процессов.

3. По результатам комплексной оценки коррозионных свойств установлено, что наибольшей коррозионной стойкостью обладает сплав В-1341-Т1, средней – сплавы В-1461-Т1 и В-1469-Т1, наименьшей среди исследованных сплавов – В96ЦЗп.ч.-Т12.

4. Установлено, что склонность к МКК для исследованных алюминиевых сплавов в условиях натурно-ускоренных испытаний можно оценить уже после 1 года экспозиции. Результаты лабораторных исследований по оценке склонности к МКК для большинства сплавов соответствуют 1 году испытаний под навесом или 3 мес натурно-ускоренных испытаний с обливом; корреляция с экспозицией на открытой площадке отсутствует.

5. Для оценки склонности сплавов к РСК в натуральных условиях необходимо проведение длительных испытаний в течение 5–7 лет либо в натурно-ускоренных условиях в течение 2 лет.

6. Для получения достоверных сведений о коррозионной стойкости алюминиевых сплавов необходимо проведение комплексных испытаний как лабораторными, так

и натурными методами, в том числе с дополнительным воздействием коррозионно-активными компонентами, с последующей оценкой изменения физико-механических характеристик.

Статья подготовлена на основе доклада на конференции «Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов» (9 октября 2015 г., ФГУП «ВИАМ»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Долговечность изделий и коррозионная усталость конструкционных материалов // *Вопросы материаловедения*. 2013. №1. С. 220–229.
3. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: *Металлургия*, 1976. 472 с.
4. ГОСТ 9.913–90. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий, магний и их сплавы. Методы ускоренных коррозионных испытаний / Гос. комитет СССР по стандартам. М., 1990. 10 с.
5. ГОСТ 9.021–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Алюминий и сплавы алюминиевые. Методы ускоренных испытаний на межкристаллитную коррозию / Гос. комитет СССР по стандартам. М., 1974. 4 с.
6. ГОСТ 9.904–82. Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию / Гос. комитет СССР по стандартам. М., 1982. 10 с.
7. ГОСТ 9.019–74. Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые и магниевые. Методы ускоренных испытаний на коррозионное растрескивание / Гос. комитет СССР по стандартам. М., 1974. 18 с.
8. Moran J.P., Bovard F.S., Chrzan J.D., Rioja R.J., Colvin E.L. Improvements in corrosion resistance offered by newer generation 2x99 aluminum-lithium alloys for aerospace applications // *Proceedings of the 12th International Conference on Aluminium Alloys*. Yokohama, Japan. 2010. P. 1492–1497.
9. 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.
10. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость и свойства алюминиевых сплавов авиационного назначения в условиях морского субтропического климата: дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 125 с.
11. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) // *Коррозия: материалы, защита*. 2013. №12. С. 6–18.
12. Каримова С.А., Жиликов В.П., Михайлов А.А., Чесноков Д.В., Игонин Т.Н., Карпов В.А. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов в условиях воздействия морской атмосферы // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. №10. С. 1–3.
13. Синявский В.С., Калинин В.Д., Александрова Т.В. Новый метод ускоренных коррозионных испытаний алюминиевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2013. №2. С. 89–93.
14. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость образцов сплава 1201 в морских субтропиках // *Коррозия: материалы, защита*. 2015. №3. С. 1–5.
15. Панченко Ю.М., Стрекалов П.В., Чесноков Д.В., Жирнов А.Д., Жиликов В.П., Каримова С.А., Тарараева Т.И. Зависимость коррозионной стойкости сплава Д16 от засоленности и метеопараметров приморской атмосферы // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №3. С. 8–14.

16. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость листов сплава Д16ч.-Т в морских субтропиках // Труды ВИАМ: электрон.науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.12.2015). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-11-11.
17. Розенфельд И.Л., Рубинштейн Ф.И., Жигалова К.А. Защита металлов от коррозии лакокрасочными покрытиями. М.: Химия, 1987. С. 7–9.
18. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
19. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С., Михайлов Е.Д. Алюминийлитиевые сплавы для самолетостроения // Металлург. 2012. №5. С. 31–35.
20. Антипов В.В., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Развитие алюминийлитиевых сплавов и многоступенчатых режимов термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 183–195.
21. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Попов В.И., Овчинников В.В., Шамрай В.Ф. Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплава В-1341 системы Al–Mg–Cu // Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 3–8.
22. Рябов Д.К., Колобнев Н.И., Самохвалов С.В., Махсидов В.В. Влияние предварительного естественного старения на свойства сплава 1913 в искусственно состаренном состоянии // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 8–11.
23. Курс М.Г., Каримова С.А. Натурно-ускоренные испытания: особенности методики и способы оценки коррозионных характеристик алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 51–57.
24. Andreatta F., Druartb M.-E., Lanzuttiaandother A. Localized corrosion inhibition by cerium species on clad AA2024 aluminum alloy investigated by means of electrochemical micro-cell // Corrosion Science. 2012. V. 65. P. 376–386.