УДК 669.715:620.193

М.А. Фомина[1], С.А. Каримова[1]

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ ЛИСТОВ СПЛАВА В-1461-Т1 ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ВСЕКЛИМАТИЧЕСКИМ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Исследовано коррозионное поведение высокопрочного свариваемого алюминийлитиевого сплава марки В-1461 системы Al–Cu–Li–Zn при ускоренных лабораторных и натурных коррозионных испытаниях в условиях умеренно теплого климата приморской атмосферы; использованы стандартизованные методы испытаний на склонность к наиболее опасным видам коррозионных поражений – межкристаллитной, расслаивающей коррозии, коррозионному растрескиванию. Исследовано влияние режимов старения на коррозионную стойкость листов из сплава В-1461, в том числе при воздействии эксплуатационных нагревов.

Ключевые слова: *коррозионное поведение, алюминийлитиевые сплавы, методы испытаний, коррозионные поражения.*

A corrosion behavior of high-strength weldable V-1461 aluminum-lithium alloy of Al–Cu–Li–Zn system was investigated at rapid laboratory and field corrosion tests under conditions of moderate warm climate of seaside atmosphere; standardized test methods for a tendency to the most dangerous types of corrosion damages (intercrystalline, exfoliation corrosion, corrosion cracking) were used. Influence of aging modes on corrosion resistance of V-1461 sheets including under the impact of operational heatings was investigated.

Keywords: *corrosion behavior, aluminum-lithium alloys, test methods, corrosion damages.*

[1]Федеральное 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

Развитие научно-технического прогресса в авиационной и ракетно-космической отраслях промышленности предусматривает разработку и внедрение новых конструкционных материалов в летательные аппараты и совершенствование технологий их обработки с целью повышения качества и эксплуатационной надежности изделий ответственного назначения. К таким материалам относятся алюминийлитиевые сплавы, составляющие относительно новое поколение легких сплавов с хорошими эксплуатационными характеристиками. Благодаря пониженной плотности и повышенному модулю упругости наряду с очень хорошими показателями криогенно-ударной вязкости и пластичности эти сплавы являются привлекательной и перспективной альтернативой традиционным алюминиевым сплавам и позволяют использовать их в аэрокосмической и авиационной промышлености последнее десятилетие [1, 2].

Одним из определяющих параметров, обусловливающим надежность применения металлов в конструкциях летательных аппаратов, является коррозионная стойкость. В Российской Федерации ежегодные потери металлов из-за их коррозии составляют до 12% общей массы металлофонда, что соответствует утрате до 30% ежегодно производимого металла. Кроме столь огромных прямых потерь, связанных с коррозией, существуют еще бóльшие косвенные потери. К ним относятся расходы, обусловленные потерей мощности металлического оборудования, его вынужденными простоями из-за аварий, а также расходы на ликвидацию последствий аварий, часто носящих характер экологических катастроф [3, 4].

Расширение номенклатуры применяемых в конструкциях полимерных композиционных материалов, в частности углепластиков, предъявляет к контактирующим материалам повышенные требования по коррозионной стойкости [5].

Для оценки ресурсных характеристик, прогнозирования сроков службы изделий авиационной техники необходимо знание особенностей поведения материалов в условиях, обусловливающих их коррозионное разрушение. С этой целью проводят ускоренные коррозионные и климатические испытания материалов [6], натурно-ускоренные испытания [7–9], позволяющие провести оценку коррозионных свойств применительно к всеклиматическим условиям эксплуатации конструкций. Сезонная динамика процесса коррозии при испытании в натурных климатических условиях диктует необходимость проведения длительных натурных испытаний, позволяющих прогнозировать коррозионное поведение материалов и узлов конструкции при эксплуатации в атмосферных условиях. Изучение коррозионного поведения алюминийлитиевых сплавов на данном этапе развития отечественного материаловедения является весьма актуальной задачей и позволит осуществлять

выбор материалов на стадиях разработки и конструирования изделий, повысить эксплуатационную надежность, увеличить ресурс летательных аппаратов при их эксплуатации во всеклиматических условиях.

В работе приведены основные коррозионные характеристики этих сплавов, использованы стандартизованные методы испытаний на коррозию конструкционных алюминиевых сплавов.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран высокопрочный свариваемый алюминийлитиевый сплав В-1461 системы Al–Cu–Li–Zn, разработанный специалистами ВИАМ (под руководством академика РАН И.Н. Фридляндера и д.т.н. Н.И. Колобнева) и запатентованный в Российской Федерации (1998 г.). Сплав 2099 (США), химический состав которого практически совпадает с составом сплава В-1461, зарегистрирован в Международной алюминиевой ассоциации только в 2002 г. Сплав В-1461 разрабатывался как альтернатива традиционному высокопрочному сплаву В95о.ч.-Т2 [10, 11]. Сплав В-1461 отличается пониженной плотностью (2,63 г/см^3), повышенным модулем упругости (79 ГПа) и обладает лучшими характеристиками прочности и жаропрочности по сравнению с серийным сплавом В95 [11]. Основные механические свойства листов из сплава В95о.ч.-АТ2 и В-1461-БТ1 приведены в табл. 1.

Проведены ускоренные испытания листов из сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2 на склонность к наиболее опасным видам коррозионных поражений: межкристаллитной расслаивающей коррозии, коррозионному растрескиванию [12].

Испытания на склонность к межкристаллитной коррозии проведены в соответствии с ГОСТ 9.021 в растворе 2 (состав раствора: 1 н. раствор NaCl+0,3% H_2O_2) на образцах размером 20×10 мм. После выдержки в растворе изготовлены микрошлифы и проведены металлографические исследования на микроскопе Olympus GX51, определены характер и глубина коррозионных поражений.

Испытания на склонность к коррозионному растрескиванию выполнены по ГОСТ 9.019 на образцах, вырезанных в поперечном направлении, методом постоянной осевой растягивающей нагрузки на установке «Сигнал» с периодической подачей коррозионной среды: 50 мин на воздухе, 10 мин в 3%-ном растворе NaCl. Критериями сопротивления сплава коррозионному растрескиванию являлись условное критическое напряжение ($\sigma^{у}_{кр}$) и количество суток, которое образцы выстояли без разрушения.

Испытания на склонность к расслаивающей коррозии сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2 проведены по ГОСТ 9.904 в растворах 2 и 4 соответственно, на образцах размером 60×40 мм. По окончании срока испытаний проведены визуальный осмотр образцов и оценка состояния поверхности по десятибалльной шкале в соответствии с ГОСТ 9.904.

Исследована климатическая стойкость сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2 при проведении натурной экспозиции в условиях умеренно теплого климата приморской атмосферы на открытой площадке в течение 1–3 лет в Геленджикском центре климатических испытаний (ГЦКИ). Испытательный полигон ГЦКИ расположен на Тонком мысе Геленджикской бухты Черного моря в 20 м от уреза воды (рис. 1); характеризуется умеренно теплым климатом с мягкой зимой и повышенной коррозионной активностью атмосферы (9 баллов по ГОСТ 9.039). Станция не имеет вблизи источников загрязнения воздуха промышленными отходами.



Рис. 1. Натурная экспозиция образцов на открытой площадке ГЦКИ

Исследовано влияние режимов старения на коррозионную стойкость листов из сплава В-1461, в том числе при воздействии эксплуатационных нагревов.

Определены электрохимические свойства сплавов В-1461-Т1 и В95-Т2. Измерения проводили в 3%-ном растворе NaCl (pH ~6,8) при комнатной температуре в трехэлектродной ячейке. В качестве противоэлектрода использовали платиновую пластину. Хлорсеребряный электрод применяли в качестве электрода сравнения (потенциал относительно нормального водородного электрода: +0,201 В). Рабочая площадь образца составляла 1 см^2. Для определения стационарного потенциала ($E_{ст}$) образцы перед началом

Таблица 1

Механические свойства листов из сплавов В-1461-БТ1 и В95о.ч.-АТ2

Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ,%	*E*, ГПа
	МПа			
В-1461-БТ1	550	495	13,5	79
В95о.ч.-АТ2	545	430	10,5	69

Таблица 2

Результаты ускоренных испытаний листов из сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2

Сплав	Полуфабрикат	Глубина МКК, мм	РСК, балл	КР: $\sigma_{кр}^{у}$ *, МПа
В-1461-Т1	Лист толщиной 2,5 мм	0,035	2–3	≥300
В95о.ч.-Т2	Лист толщиной 3 мм	0,035	3–5	≥300

* $\sigma_{кр}^{у}$ – условный критический уровень напряжения (на более высокий уровень напряжения листы из сплавов не испытывали).

Таблица 3

Характер и глубина коррозионных поражений сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2 после 1–3 лет экспозиции в ГЦКИ

Сплав (полуфабрикат)	Продолжительность экспозиции, годы	Характер/глубина коррозионных поражений, мм*
В-1461-Т1 (лист 2,5 мм)	1 2 3	МКК/0,035 МКК/0,07 МКК/0,105
В95о.ч.-Т2 (лист 3 мм)	1 2 3	М+МКК/0,07 М+МКК/0,105 М+МКК/0,17+РСК

* МКК – межкристаллитная коррозия; М – местная; РСК – расслаиваю-

Таблица 4

Коррозионные свойства листов из сплава В-1461-Т1 после различных нагревов

Полуфабрикат	Режим термической обработки	Режим эксплуатационного нагрев	Склонность к МКК: глубина, мм (ГОСТ 9.021)	Склонность к РСК, балл (ГОСТ 9.904)	Склонность к КР* (ГОСТ 9.019)	
					$\sigma_{кр}^{у}$ ($0{,}75\sigma_{0,2}$), МПа	Долговечность, сут (среднее значение)
Лист толщиной 2,5 мм	130°С, 20 ч+ +160°С, 16 ч	–	Нет	2	≥300	>45
		160°С, 100 ч	0,07–0,14	2	≥290	>45
		85°С, 1000 ч	0,07–0,14	4	≥300	>45
	1	–	Нет	8	<290	18
	2	–	Нет	2–3	≥320	>45
Лист толщиной 3 мм	*3*	–	Нет	3	350	>45
		150°С, 100 ч	0,042	3–4	350	>45
		85°С, 1000 ч	Нет	3	350	>45

* Определена для образцов, вырезанных в поперечном направлении, на установке «Сигнал».

Таблица 5

Значения стационарных потенциалов образцов из сплава В-1461-Т1 после различных режимов старения в 3%-ном растворе NaCl

Режим	*1*	*2*	*3*
Потенциал $E_{ст}$, В	-0,428	-0,447	-0,456

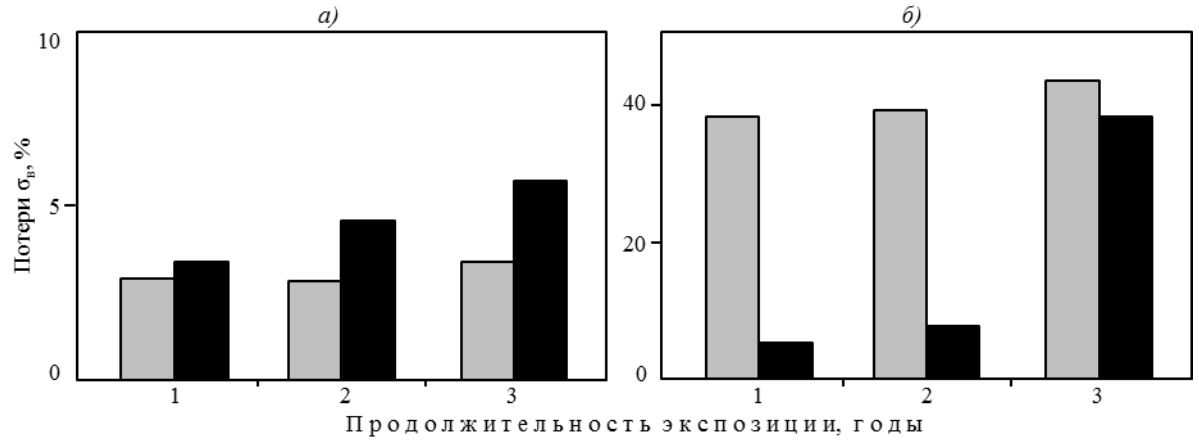


Рис. 2. Потери $\sigma_в$ (*а*) и δ (*б*) сплавов В-1461-Т1 (■) и В95о.ч.-Т2 (■) после экспозиции в ГЦКИ

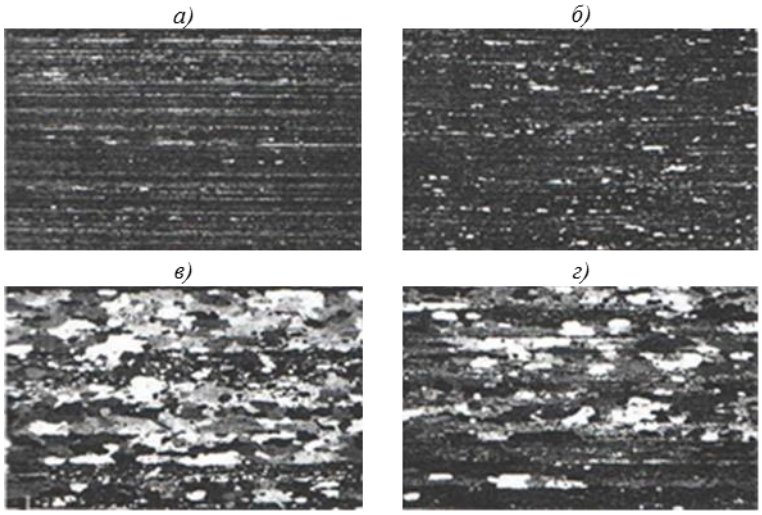


Рис. 3. Микроструктура (×100) листов из сплава В-1461-Т1 толщиной 2,5 (*а*, *б*) и 3,0 мм (*в*, *г*) в продольном (*а*, *в*) и поперечном направлениях (*б*, *г*)

электрохимических измерений выдерживали в 3%-ном растворе NaCl в течение 24 ч.

Результаты и обсуждение

Ускоренные испытания сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2 различными методами позволили сделать вывод о достаточно высокой коррозионной стойкости сплавов к наиболее опасным видам коррозионных поражений: межкристаллитной коррозии (МКК), расслаивающей коррозии (РСК), коррозионному растрескиванию (КР). Результаты ускоренных испытаний приведены в табл. 2.

При проведении натурной экспозиции сплавов в условиях умеренно теплого климата приморской атмосферы ГЦКИ на открытой площадке в течение 1–3 лет установлена закономерность деградации механических свойств в зависимости от срока экспозиции сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2. Потери механических свойств для сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2 представлены на рис. 2. Данные по характеру и глубине коррозионных поражений сплавов после 1–3 лет экспозиции в ГЦКИ отражены в табл. 3.

С увеличением срока экспозиции происходит увеличение глубины коррозионных поражений на листах из сплавов В-1461-Т1 и В95о.ч.-Т2. Резкое изменение значений потерь относительного удлинения (срок экспозиции: 3 года) на листах из сплава В95о.ч.-Т2 обусловлено возникновением коррозионных поражений расслаивающего характера. Потери относительного удлинения на листах из сплава В-1461 значительно выше, чем на листах из сплава В95о.ч.-Т2, что, возможно, связано с более равномерным распределением коррозионных поражений по поверхности листов из сплава В95о.ч.-Т2 и более локализованными коррозионными поражениями на поверхности листов из сплава В-1461-Т1.

На основании ранее проведенных работ [13–16] выбраны экспериментальные режимы старения для определения их влияния на коррозионное поведение листов из сплава В-1461, обеспечивающие наилучшее сочетание прочностных свойств и вязкости разрушения, – режимы ступенчатого старения: со старением на первой ступени – при 120°С и последующих – при 140°С (*1* и *3* режимы) или по режиму *2* при 140°С (первая ступень)+150°С (вторая ступень). Режим *3* характеризуется более длительной выдержкой на второй ступени старения по сравнению с режимом *1*.

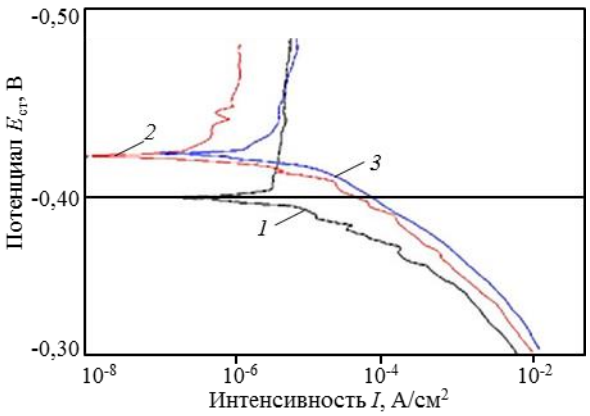


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые образцов из сплава В-1461-Т1, выдержанных в 3%-ном растворе NaCl, после различных режимов старения (*1–3*)

В работе исследованы листы как с преимущественно нерекристаллизованной структурой (рис. 3, *а*, *б*), так и с частично рекристаллизованной (рис. 3, *в*, *г*) [14].

Проведены исследования коррозионного поведения листов из сплава В-1461-Т1, обработанных по приведенным режимам старения, и влияния эксплуатационных нагревов на их коррозионную стойкость. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Данные по электрохимическому исследованию образцов из сплава В-1461-Т1 представлены в табл. 5 и на рис. 4.

Как видно из графика (см. рис. 4), потенциалы пробоя образцов из сплава В-1461-Т1, состаренных по режимам *2* и *3*, лежат в более электроотрицательной области, что еще раз подтверждает их повышенную коррозионную стойкость в сравнении с режимом *1*. При этом на образце, термообработанном по режиму *2* (см. рис. 4, кривая *2*), более затруднена катодная реакция.

Как видно из данных табл. 4, а также данных по электрохимическому исследованию (см. табл. 5 и рис. 4), для всех приведенных режимов выявлена достаточно высокая стойкость ко всем видам коррозии; наложение эксплуатационных нагревов не снижает или снижает в незначительной мере коррозионную стойкость сплава. Однако применение режима *1* привело к повышению значений расслаивающей коррозии (РСК: 8 балл), снижению сопротивления коррозионному растрескиванию и, соответственно, прочностных свойств в результате недостаренного состояния структуры. Снижение коррозионной стойкости в недостаренном состоянии по сравнению со старением на максимальную прочность показано и для аналогов сплава В-1461 – американских сплавов 2090 и 2099 [17].

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований показаны высокая коррозионная стойкость алюминийлитиевого сплава В-1461 и его преимущества по наиболее опасным и часто встречающимся при эксплуатации видам коррозионных поражений.

Высокая коррозионная стойкость алюминийлитиевого сплава В-1461-Т1 в сочетании с высокими прочностными свойствами делает его перспективным для применения в изделиях авиационной техники, эксплуатирующейся во всеклиматических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Фридляндер И.Н., Чуистов К.В., Березина А.Л. и др. Алюминий-литиевые сплавы. Структура и свойства. К.: Наукова думка. 1992.
3. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит. 2002. 336 с.
4. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
5. Каблов Е.Н., Каримова С.А., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком //Коррозия: материалы и защита. 2011. №12. С. 1–7.
6. Каримова С.А., Жиликов В.П., Михайлов А.А. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов в условиях воздействия морской атмосферы //Коррозия: материалы и защита. 2012. №10. С. 1–3.
7. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В. и др. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 16–20.
8. 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.
9. Жирнов А.Д., Стрекалов П.В., Каримова С.А., Жиликов В.П. Сезонная динамика процесса коррозии металлов на береговой зоне Черного моря //Коррозия: материалы и защита. 2007. №8. С. 23–29.
10. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
11. 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.
12. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М.: Изд-во АН СССР. 1945. 350 с.
13. Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С., Пономарев Е.К. Влияние режимов старения на коррозионную стойкость листов из сплава В-1461 системы Al–Li–Cu––Zn–Mg //Металлургия машиностроения. 2012. №3. С. 22–26.
14. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Оглодков М.С. и др. Изменение фазового состава в зависимости от режимов старения и структуры полуфабрикатов сплава В-1461 //МиТОМ. 2012. №6. С. 20–24.
15. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И. и др. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 7–11.
16. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Антипов В.В. и др. Алюминийлитиевые сплавы /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. Юбилейный науч.-техн. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 163–171.
17. Moran J.P., Bovard F.S., Chrzan J.D. et al. Improvements in Corrosion Resistance Offered By Newer Generation 2x99 Aluminum-Lithium Alloys for Aerospace Applications /In.: Proceedings of the 12-th International Conference on Aluminium Alloys. Yokohama. 2010. P. 1492–1497.