

УДК 620.193.21

М.Г. Курс¹**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ОБШИВКИ ЛА ИЗ ДЕФОРМИРУЕМОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В95о.ч.-Т2 С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-101-109

Представлена методика прогнозирования коррозионных потерь деформируемых алюминиевых сплавов на длительные сроки экспозиции, основанная на анализе кинетики изменения параметров коррозионного разрушения при натурно-ускоренных испытаниях. Приведены результаты исследования коррозионной стойкости панели с ребрами жесткости из сплава В95о.ч.-Т2, применяемого в качестве элементов обшивки конструкций летательных аппаратов (ЛА), с прогнозной оценкой изменения его прочностных свойств посредством применения метода расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения.

Ключевые слова: *коррозия, алюминиевые сплавы, интегральный коррозионный коэффициент, натурно-ускоренные испытания.*

М.Г. Курс¹**FORECASTING THE STRENGTH PROPERTIES OF THE SKIN COVER OF A DEFORMABLE ALUMINUM ALLOY В95о.ч.-Т2 WITH THE USE OF THE INTEGRATED CORROSION REDUCTION COEFFICIENT**

A technique for predicting the corrosion losses of deformable aluminum alloys for long exposure times is presented, based on an analysis of the kinetics of the change in the parameters of corrosion failure in field-accelerated tests. The results of the corrosion resistance test of a panel with stiffeners made of В95о.ч.-Т2 alloy used as structural elements of aircraft structures with a predictive evaluation of the change in its strength properties are presented using the method of calculating the integral coefficient of corrosion failure.

Keywords: *corrosion, aluminum alloys, integral corrosion coefficient, field-accelerated tests.*

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

Коррозионный износ металлической конструкции является следствием синергетического воздействия факторов внешней среды в сочетании с механическими нагрузками, ускоряющими скорость коррозионных процессов. Вследствие склонности металлов к коррозии предъявляются повышенные требования к выбору материалов, соединений и систем защитных покрытий, а также рациональному проектированию.

Проведение комплексных климатических испытаний для обеспечения безопасной эксплуатации деформируемых алюминиевых сплавов нового поколения, применяемых в качестве основных конструкционных материалов в изделиях авиакосмической техники и

позволяющих решить задачи повышения весовой эффективности конструкции при сохранении высокого уровня прочностных и технологических характеристик, относится к приоритетным стратегическим направлениям развития материалов и технологий [1–3].

В настоящее время средний срок службы действующего парка магистральных пассажирских самолетов (характеризующий общее состояние парка по срокам эксплуатации) составляет 13,8 года, региональных – 27,4 года, грузовых – 22,8 года, легких – 27,2 года. Наиболее «старыми» в парке являются отечественные типы самолетов предыдущих поколений Ил-62М, Ту-134, Ан-24, Як-40, Ту-154Б, Ан-2, Ан-12, а также зарубежные В-737-200, В-747-200 – их средний срок службы превышает 25 лет [4]. Из опыта эксплуатации отечественных и зарубежных воздушных судов выявлено, что наиболее часто коррозия возникает и распространяется на элементах конструкции фюзеляжа: обшивке, стрингерном наборе, шпангоутах, балках пола [5, 6].

Возникающие в процессе эксплуатации коррозионные поражения требуют своевременного обнаружения и устранения. При диагностике и проведении регламентных осмотров изделий авиационной техники особое внимание уделяют местам с повышенным скоплением конденсата и влаги, а также местам контакта разнородных материалов – как наиболее опасным в коррозионном отношении факторам [7]. Основным методом оценки коррозионного состояния конструкций изделий летательных аппаратов (ЛА) в процессе их эксплуатации является визуальный осмотр, в отдельных случаях сопровождающийся неразрушающим контролем. На основе результатов осмотра специалисты принимают решение о необходимости ремонта, замены детали либо о продлении ресурса. Основной трудностью проведения дефектации изделия является невозможность осмотра скрытых полостей и выявления внутренних дефектов, в том числе подповерхностной коррозии (наиболее опасной – межкристаллитной) неразрушающими методами контроля.

В настоящее время к числу приоритетных направлений развития комплексных климатических испытаний для обеспечения безопасной эксплуатации воздушных судов относят усовершенствование методик определения коррозионных поражений самолета в процессе эксплуатации, а также получение опережающей информации о влиянии климатических факторов на надежность изделий [8, 9].

Основным препятствием разработки методик прогнозирования сохраняемости механических свойств алюминиевых сплавов является характерная для них склонность к локальным видам коррозионного разрушения, в то время как, например, для равномерно разрушающихся углеродистых сталей широко используются методы прогнозирования коррозионных потерь по показателям снижения массы [10–12].

Анализ результатов длительной натурной экспозиции [13] показывает, что для достоверной оценки стойкости материалов к воздействию внешних факторов необходимы длительные сроки экспозиции либо проведение натурно-ускоренных испытаний.

Ранее в работах [14, 15] предложен метод расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения алюминиевых сплавов, включающего наиболее значимые и чувствительные к изменению агрессивности коррозионного воздействия параметры, характеризующие коррозионно-активное состояние материала.

В данной работе на основе четырехлетних испытаний алюминиевых сплавов пяти систем предложен способ прогнозирования потерь прочности алюминиевых сплавов на более длительные сроки экспозиции на основе анализа кинетики изменения коррозионных характеристик образцов алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях.

Апробация методики прогнозирования проведена на панели с ребрами жесткости из сплава В950.ч.-Т2, применяемом в качестве материала обшивки, после 8 лет испытаний в Геленджикском центре климатических испытаний (ГЦКИ) ВИАМ им. Г.В. Акимова.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 18.2. «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Преимущества применения натурно-ускоренного метода климатических испытаний для получения сведений о поведении материалов в жестких условиях повышенного содержания хлорид-ионов в атмосфере приведены в работах [16].

В данной работе проведены натурно-ускоренные испытания в ГЦКИ, представляющим умеренно теплый климат, характеризующийся повышенным содержанием хлоридов в атмосфере. Испытания осуществляли в следующих условиях:

– при установке образцов в горизонтальном положении на стенде под навесом климатической станции;

– при экспозиции образцов без облива и с обливом методом распыления мелкодисперсного раствора морской соли с концентрацией 5 г/л с помощью пульверизатора 1 раз в день в вечернее время.

Общий срок экспозиции составил 6 лет с промежуточными съемами после 3 и 6 мес, а также через 1; 2 и 4 года.

Для испытаний применяли образцы в виде листов толщиной ~2 мм из деформируемых алюминиевых сплавов пяти различных систем.

Для исследуемых материалов после испытаний проведена оценка потерь массы, глубины и характера межкристаллитной коррозии (МКК), глубины питтинговой коррозии и склонности к расслаивающей коррозии (РСК). Расчет интегрального коэффициента [14] проводится с учетом различной степени влияния этих параметров на снижение механических свойств. В табл. 1 показана градация параметров коррозионного разрушения, особенности кинетики их развития и способы выявления на материале, эксплуатируемом в составе конструкции.

Наибольшую опасность представляет МКК, при которой в результате растворения фаз по границам зерен (вследствие структурной и электрохимической гетерогенности сплава между границей и зерном) происходит наиболее значительное снижение механических свойств. Наиболее критичным аспектом данного вида коррозии является невозможность достоверного ее выявления в конструкции с применением неразрушающих методов контроля.

Таблица 1

Основные виды коррозионного разрушения алюминиевых сплавов

Значимость влияния	Исследуемый показатель	Особенности коррозионного разрушения	Способ выявления в конструкции
Увеличение значимости влияния на снижение механических свойств ↓	Потеря массы	Оказывает наименьшее влияние, скорость роста снижается со временем	Не контролируется
	Питтинговая коррозия	Может являться концентратором напряжения	Визуально/капиллярный метод контроля
	Расслаивающая коррозия	Скорость роста не снижается со временем	Определяется визуально
	Межкристаллитная коррозия	Скорость роста снижается со временем для большинства сплавов	Отсутствуют методики выявления неразрушающими методами контроля

Таким образом, применение результатов, свидетельствующих о склонности к тем или иным видам локальной коррозии и кинетики их развития при синергетическом воздействии факторов внешней среды, позволило бы в значительной мере повысить информативность профилактических осмотров и способствовать обоснованию мер по рекомендациям проведения ремонтных мероприятий при наличии коррозионных поражений в конструкции.

Результаты и обсуждение

На рис. 1–3 показаны кинетические кривые изменения потерь массы, глубины питтинговой и межкристаллитной коррозии, а также построены прогнозные кривые для определения потенциальных потерь после 6 лет испытаний. Показано, что наиболее оптимальным является применение степенной зависимости.

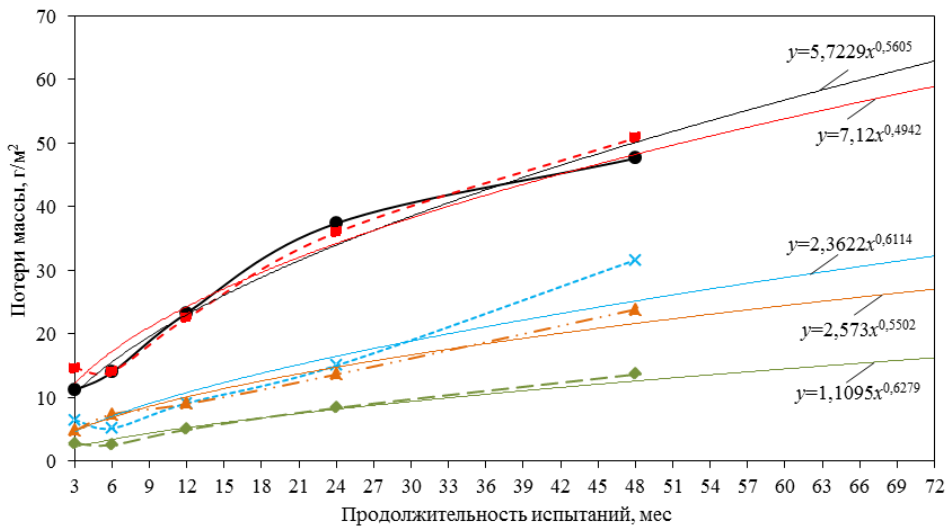


Рис. 1. Изменение потерь массы образцов из алюминиевых сплавов 1 (●), 2 (◆), 3 (×), 4 (▲) и 5 (■), а также получение прогнозных значений изменения свойств на срок до 6 лет

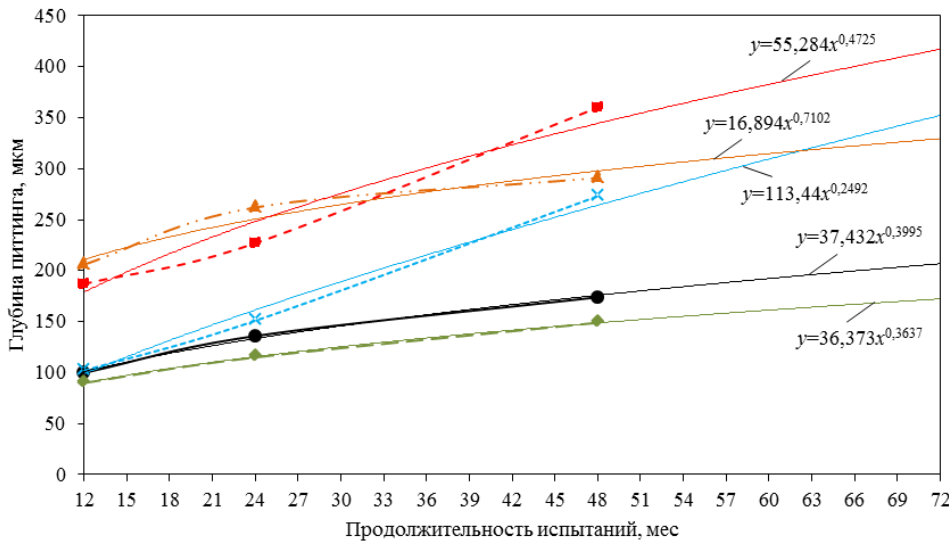


Рис. 2. Изменение глубины питтинга образцов из алюминиевых сплавов 1 (●), 2 (◆), 3 (×), 4 (▲) и 5 (■), а также получение прогнозных значений изменения свойств на срок до 6 лет

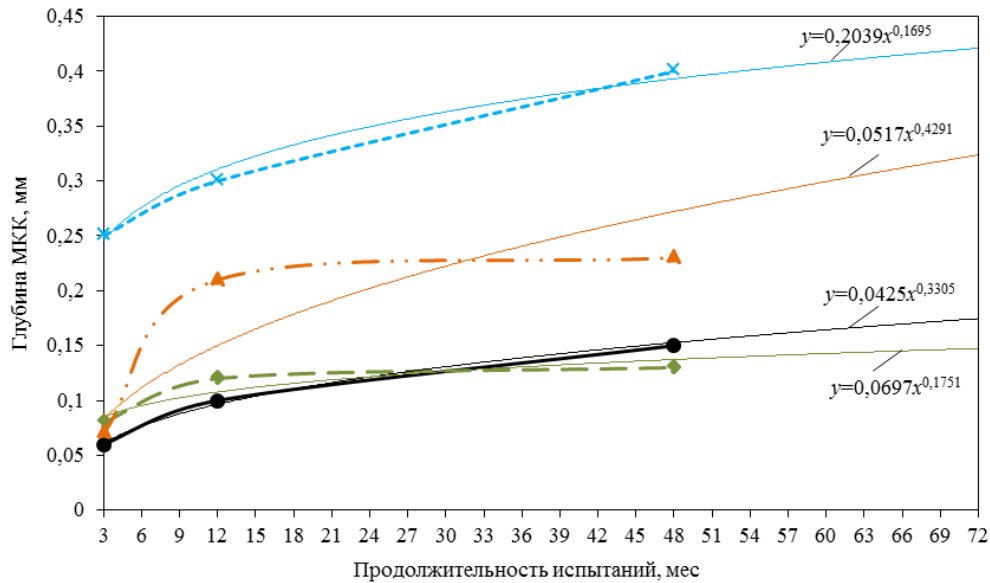


Рис. 3. Изменение глубины МКК образцов из алюминиевых сплавов 1 (●), 2 (◆), 3 (×) и 5 (▲), а также получение прогнозных значений изменения свойств на срок до 6 лет

Известно, что скорость роста МКК замедляется со временем. Сравнение результатов натурно-ускоренных испытаний с лабораторными по оценке склонности к МКК по ГОСТ 9.021–74 показало, что обладающие повышенной склонностью к МКК сплавы 3 и 5 (0,25 и 0,2 мм соответственно) характеризуются склонностью к росту МКК и после длительной экспозиции. Для сплавов 1 и 2, показавших меньшую склонность к МКК в растворе (0,05 и 0,1 мм соответственно), характерна стабилизация роста уже после 1 года испытаний.

По полученным прогнозным кривым определены значения показателей коррозионной стойкости после 6 лет испытаний, по которым в соответствии с методикой [14] рассчитан интегральный коррозионный коэффициент (табл. 2). Для сплавов 2 и 5, показавших склонность к РСК, взяты значения РСК, полученные после 4 лет натурно-ускоренных испытаний.

Таблица 2

Расчет интегрального коррозионного коэффициента ($K_{кc}$)

Условный номер сплава	Индекс потери массы (С)	Индекс глубины питтинга (П)	Индекс глубины МКК (М)	Склонность к РСК, балл	Индекс $K_{кc}$ *
1	С5	П4	М3	2	К4
2	С3	П4	М3	7	К6
3	С5	П5	М5	2	К7
4	С4	П5	М1	2	К2
5	С5	П5	М4	8	К7

* Интегральный коррозионный коэффициент.

Ранее в работе [14] на основе анализа объема данных по результатам натурно-ускоренных испытаний получены диапазоны прочностных потерь – пределов прочности при растяжении и текучести, соответствующих индексам интегрального коэффициента по шкале от 1 до 7 (рис. 4).

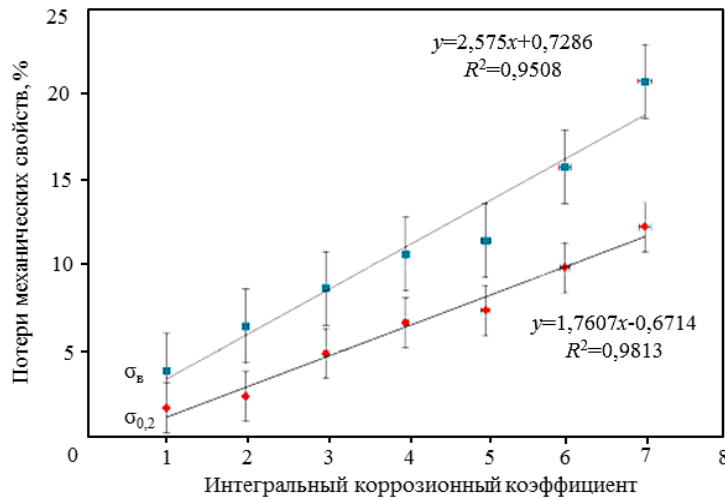


Рис. 4. Соответствие индексов интегрального коррозионного коэффициента потерям механических свойств [14]

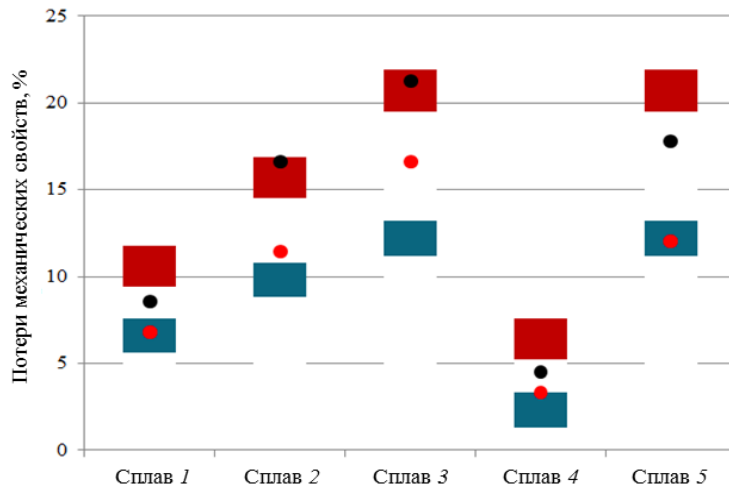


Рис. 5. Реальные (■ – $\Delta\sigma_B$; ■ – $\Delta\sigma_{0,2}$) и прогнозные значения (● – $\Delta\sigma_B$; ● – $\Delta\sigma_{0,2}$) потерь механических свойств

Для всех образцов, для которых получены прогнозные значения снижения механических свойств проведено также экспериментальное определение изменения механических свойств. На рис. 5 приведено сопоставление реальных значений снижения механических свойств и прогнозных диапазонов. Видно, что отклонения реальных значений от прогнозных диапазонов составляют: 11% – для предела прочности при растяжении и 22% – для предела текучести, что в абсолютном выражении составляет не более 2 и 5% соответственно.

Апробация методики прогнозирования изменения прочностных свойств на элементе конструкции из сплава В950.ч.-Т2

Метод расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения для элементов конструкций основан на применении результатов оценки коррозионных поражений, выявляемых неразрушающими методами контроля, – с помощью визуальной оценки, лазерной сканирующей микроскопией, а также на основе анализа данных по коррозионной стойкости образцов-свидетелей после натурно-ускоренных либо лабораторных испытаний, по которым, в частности, устанавливается склонность сплава к МКК.

Натурным климатическим испытаниям в течение 8 лет подвергали элемент конструкции в виде панели из обшивочного листа толщиной ~ 2 мм с ребрами жесткости из сплава В95о.ч.-Т2 без защитного покрытия (рис. 6). По результатам этих натурных испытаний на открытой площадке выявлено наличие коррозионных поражений на 90% поверхности панели (рис. 7). Расслаивающаяся коррозия как в зоне обшивки, так и в зоне крепежных элементов, отсутствует (рис. 6, в).



Рис. 6. Панель с ребрами жесткости из сплава В95о.ч.-Т2:

а – внешний вид конструкции; б – образцы, изготовленные из обшивочной части; в – элемент стрингеного набора

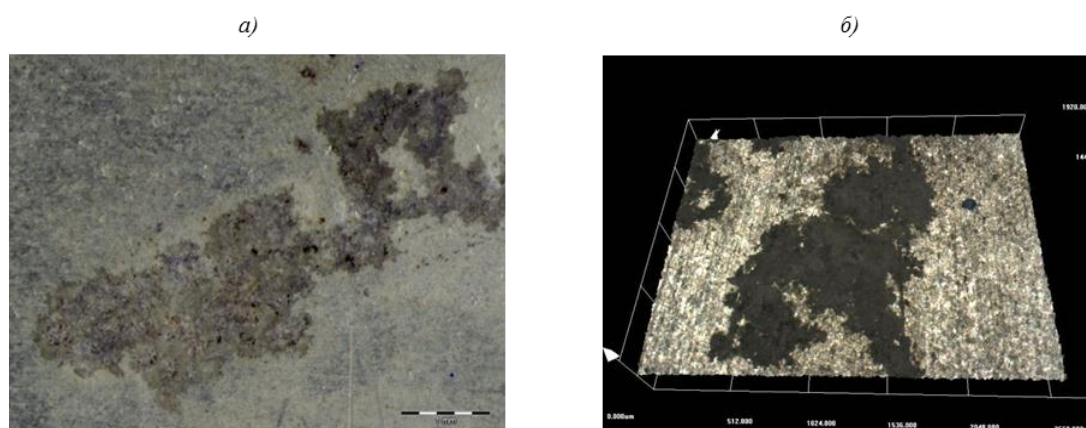


Рис. 7. Очаги коррозионных поражений (а – $\times 10$; б – $\times 200$) элемента панели из сплава В95о.ч.-Т2

По общей коррозионной стойкости высокопрочные алюминиевые сплавы сопоставимы с дюралюминами, но в отличие от последних они менее чувствительны к МКК. В отличие от состояния максимальной прочности – режим термообработки Т1, при котором высокопрочные сплавы склонны к коррозионному растрескиванию и РСК, старение по смягчающим режимам Т2 и Т3 радикально повышает их коррозионную стойкость [17, 18].

На образцах-свидетелях из листа сплава В95о.ч.-Т2 проведена оценка склонности к МКК, в результате чего установлено, что после 1,5 лет натуральных испытаний плакированных листов МКК отсутствует, глубина питтинговой коррозии не превышает 50 мкм. Согласно данным лабораторных испытаний, склонность к МКК сплава В95о.ч.-Т2 в растворе отсутствует, что позволяет предположить сохранение стойкости сплава к МКК в течение длительного периода эксплуатации.

Таким образом, при расчете интегрального коэффициента (метод Б) установлено, что интегральная коррозионная стойкость сплава В95о.ч.-Т2 составляет К1. Согласно данным, приведенным на рис. 4, прогнозируемое снижение прочностных свойств для индекса К1 должно составить $3,8 \pm 1,2\%$ – для предела прочности при растяжении ($\Delta\sigma_b$) и $1,6 \pm 1,0\%$ – для предела текучести ($\Delta\sigma_{0,2}$).

Для проверки прогнозных значений из обшивочной части панели изготовили стандартные образцы для испытаний на осевое растяжение по ГОСТ 1497–84 (рис. 6, б). В результате проведенных испытаний и расчета потерь механических свойств установлено, что потери для σ_b и $\sigma_{0,2}$ составили 4,0 и 1,8% соответственно. Таким образом, полученные с образцов-свидетелей данные по потерям механических свойств укладываются в прогнозные диапазоны, рассчитанные с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения.

По результатам металлографических исследований образцов, вырезанных из элемента конструкции, выявлено, что коррозионные поражения носят сугубо поверхностный и единичный характер (рис. 7), глубина питтинговой коррозии не превышает 50 мкм, МКК отсутствует.

Результаты исследований подтверждают высокую коррозионную стойкость конструкционного высокопрочного сплава В95о.ч.-Т2, что, наряду с высокими технологическими свойствами, а также трещиностойкостью и пластичностью, позволяет применять его в широкой номенклатуре изделий для авиакосмической техники.

Заключения

1. Апробация методики прогнозирования изменения прочностных свойств с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения, проведенная для сплава В95о.ч.-Т2, примененного в качестве обшивочного листа панели с ребрами жесткости, показала соответствие расчетных значений результатам прямых измерений на образцах, изготовленных непосредственно из панели.

2. Метод расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения может быть применен для прогнозирования снижения механических свойств алюминиевых сплавов при длительных сроках экспозиции на основе анализа кинетики развития коррозионных поражений.

3. Проведение комплексных исследований коррозионной стойкости материалов в условиях агрессивного воздействия внешней среды позволяет оценить поведение материалов в наиболее жестких условиях эксплуатации с точки зрения воздействия внешних факторов и может быть учтено в качестве рекомендаций по применению материала в изделиях обще- либо всеклиматического назначения.

4. Перспективами развития методики расчета интегрального коэффициента являются:

– установление диапазонов прочностных потерь материалов, соответствующих индексам интегрального коэффициента, в различных по степени коррозионной агрессивности средах (холодный, умеренный, тропический климат и пр.);

– установление диапазонов прочностных потерь по широкому спектру служебных характеристик (усталостные свойства);

– установление диапазонов прочностных потерь для образцов материалов, испытываемых при одновременном воздействии циклических усталостных нагрузений.

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 157–167.
3. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
4. Самойлов И.А., Страдомский О.Ю., Шапкин В.С. Состояние гражданской авиационной техники России и прогноз ее обновления до 2030 года // *Научный вестник МГТУГА*. 2013. Вып. 187. С. 7–18.
5. Зубарев А.П., Лапаев А.В., Лапаев В.П. Использование обобщенного параметра коррозионного поражения для оценки долговечности элементов конструкций с коррозионными поражениями // *Научный вестник МГТУГА*. 2007. Вып. 119. С. 30–32.
6. Акоюн К.Э., Лапаев А.В., Семин А.В. Анализ коррозионного состояния самолетов Ту-154М ОАО Авиакомпания «АЭРОФЛОТ-РАЛ». По данным материалов технического обслуживания в объеме формы «2» // *Научный вестник МГТУГА*. 2007. Вып. 119. С. 24–29.
7. Фомина М.А., Каримова С.А. Анализ коррозионного состояния материалов планера самолетов типа «Су» после длительных сроков эксплуатации // *Коррозия: материалы, защита*. 2014. №9. С. 20–24.
8. Бакшаев С.И., Гаврилов И.В. Климатические испытания материалов и изделий техники // *Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате: сб. докл. II Междунар. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2016. Ст. 02 (CD)*.
9. Лавро Н.А., Сухоиваненко В.В., Дюдин В.Б., Будюк Г.Ю. Анализ эффективности антикоррозионной защиты самолетов Бе-200ЧС, эксплуатирующихся в МЧС России и ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева» // *Коррозия, старение и биостойкость материалов в морском климате: сб. докл. II Междунар. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2016. Ст. 09 (CD)*.
10. ГОСТ 9.040–74 ЕСЗКС. Металлы и сплавы. Расчетно-экспериментальный метод ускоренного определения коррозионных потерь в атмосферных условиях. М.: Изд-во стандартов, 1974. 14 с.
11. Михайлов А.А., Панченко Ю.М., Игонин Т.Н., Ковтанюк В.В. Атмосферная коррозия цинка: картографирование скорости коррозии на европейской территории Российской Федерации // *Коррозия: материалы, защита*. 2012. №9. С. 1–5.
12. Михайлов А.А., Панченко Ю.М., Игонин Т.Н. и др. Атмосферная коррозия углеродистой стали: моделирование и картографирование территории Российской Федерации // *Коррозия: материалы, защита*. 2010. №11. С. 1–10.
13. Луценко А.Н., Курс М.Г., Лаптев А.Б. Обоснование сроков натуральных климатических испытаний металлических материалов в атмосфере черноморского побережья. Аналитический обзор // *Вопросы материаловедения*. 2016. №3 (87). С. 126–137.
14. Курс М.Г., Антипов В.В., Луценко А.Н., Кутырев А.Е. Интегральный коэффициент коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №3 (42). С. 24–32. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-24-32.
15. Курс М.Г., Антипов В.В., Кутырев А.Е. Прогнозирование потерь прочностных свойств листовых деформируемых алюминиевых сплавов с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения // *Фундаментальные исследования и последние достижения в области защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов и сложных технических систем в различных климатических условиях: сб. докл. III Всерос. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2016. С. 09 (CD)*.
16. Курс М.Г., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Морозова Л.В. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 1 // *Вопросы материаловедения*. 2016. №1 (85). С. 116–126.
17. *Авиационные материалы: справочник в 13 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. Т. 4: Алюминиевые и бериллиевые сплавы, ч. 1: Деформируемые алюминиевые сплавы, кн. 2. М.: ВИАМ, 2009. С. 49–50.*
18. Сенаторова О.Г., Грушко О.Е., Ткаченко Е.А., Антипов В.В. и др. Новые высокопрочные алюминиевые сплавы и материалы // *Технология легких сплавов*. 2007. №2. С. 17–24.