

УДК 620.193.2

М.Г. Курс<sup>1</sup>, В.В. Антипов<sup>1</sup>, А.Н. Луценко<sup>1</sup>, А.Е. Кутырев<sup>1</sup>**ИНТЕГРАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-24-32

*На основе результатов четырехлетней экспозиции пяти алюминиевых сплавов (листы толщиной ~2 мм) при испытаниях натурно-ускоренным методом разработана методика расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения двумя методами: для образцов после натурно-ускоренных испытаний (метод А) и для конструкций с применением неразрушающих методов контроля (метод Б).*

*Применение комплексных методов исследования коррозионной стойкости алюминиевых сплавов и расчета интегрального коррозионного коэффициента позволит проводить оценку изменения прочностных потерь конструкций из листовых алюминиевых сплавов при их коррозионном повреждении в процессе эксплуатации при проведении плановых осмотров и ремонтных мероприятий по обслуживанию изделий авиационной техники.*

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

*Based on the results of 4-years exposure of five aluminum alloys (2 mm thick sheets) at full-scale accelerated tests, calculating procedure for integral figure of corrosion damage was developed by two methods: for samples after full-scale accelerated tests (method A) and for constructions using nondestructive control methods (method B).*

*Application of integral research methods of corrosion resistance of aluminum alloys and calculation of integrated corrosion figure will allow to estimate strength variations of constructions losses, made from sheet aluminum alloys in the case of their corrosion damages in the process of operation when performing a scheduled inspection and remedial maintenance of aviation articles.*

**Keywords:** integral figure, aluminum alloys, corrosion, full-scale accelerated tests.

<sup>1</sup>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**

Изготовление из алюминиевых сплавов ответственных несущих деталей воздушных судов требует исключения даже минимальных рисков потери прочности и несущей способности материала конструкции. Данная работа выполнена в рамках реализации раздела 18.2. «Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1], к приоритетным задачам которого относится проведение климатических испытаний алюминиевых сплавов с комплексной оценкой изменения свойств для обеспечения безопасности эксплуатации изделий авиационной техники [2, 3].

Долговечность работы материала в изделии в процессе эксплуатации определяется его механическими свойствами и стойкостью к воздействию окружающей среды. Необходимость учета коррозионного влияния на механические и усталостные свойства материала диктуется требованиями, которыми руководствуются КБ при проектировании авиационных конструкций – Нормами летной годности [4].

Определение степени коррозионной стойкости металлических материалов в атмосферных условиях является сложной задачей ввиду многогранности параметров коррозионных свойств, их различной значимости в части влияния на механические свойства, чувствительности к изменению агрессивности коррозионного воздействия, а также необходимости проведения длительных испытаний для получения достоверной оценки возможного поведения материала в процессе эксплуатации. В данной работе проведено исследование комплекса коррозионных характеристик перспективных алюминиевых сплавов при испытаниях натурно-ускоренным методом, позволяющим прогнозировать коррозионные потери материалов в жестких условиях эксплуатации, т. е. в условиях повышенной влажности и высокого содержания хлорид-ионов в атмосфере [5]. Данный вид испытаний позволяет оценить склонность к наиболее опасным видам коррозионного разрушения алюминиевых сплавов за 1–2 года испытаний, в то время как при испытаниях в условиях открытой атмосферы требуются более длительные сроки экспозиции – не менее 10 лет.

На основании полученных результатов разработан метод определения потери прочности конструкций из листовых деформируемых алюминиевых сплавов на участках с нарушенным слоем покрытия при наличии коррозионных поражений неразрушающими методами контроля при проведении профилактических и ремонтных мероприятий по обслуживанию изделий авиационной техники.

#### **Методика проведения натурно-ускоренных испытаний и материалы для исследований**

Как известно, с коррозионной точки зрения наиболее агрессивными являются морские условия, характеризующиеся повышенным содержанием в атмосфере ионов хлора [5–7]. В данной работе испытания проводили в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова [8], расположенном на берегу Черного моря. Экспозиция образцов под навесом за счет отсутствия попадания осадков и солнечных лучей позволяет накапливать хлориды на поверхности образца и обеспечивает стабильную кинетику коррозионного процесса, что делает климатические испытания более контролируемыми и независимыми от колебаний метеопараметров. Для предотвращения стекания наносимого раствора и увеличения продолжительности увлажнения поверхности выбрали горизонтальное расположение образцов на атмосферном стенде.

Натурные испытания проводили без облива; натурно-ускоренные – с ежедневным однократным нанесением методом распыления мелкодисперсного раствора морской соли с концентрацией 5 г/л.

Сроки экспозиции установлены по геометрической прогрессии в соответствии с ГОСТ 9.905–82 в течение 3 и 6 мес, 1 года, 2 и 4 лет. В период отрицательных температур облив образцов не проводили, что в условиях умеренно теплого климата ГЦКИ составляет не более 20 дней в году.

Для испытаний использовали листы толщиной ~2 мм деформируемых алюминиевых сплавов систем Al–Cu–Li (сплавы В-1461-Т1 и В-1469-Т1), Al–Zn–Mg (1913-Т3), Al–Zn–Mg–Cu (В96ЦЗп.ч.-Т12), Al–Mg–Li (1424-ТГ1) [9].

#### **Результаты натурно-ускоренных испытаний**

По результатам проведенных исследований установлено, что увеличение площади коррозионного поражения способствует повышению степени удержания хлоридов, осаждаемых на поверхности образцов, что, в свою очередь, повышает скорость коррозии (табл. 1). При испытаниях с обливом количество хлоридов на поверхности образцов и скорость коррозии в 2–4 раза больше по сравнению с образцами без облива.

При оценке склонности сплавов к межкристаллитной (МКК) и питтинговой коррозии установлено, что наибольшие значения глубины питтинга по результатам исследований характерны для сплавов В96ЦЗп.ч.-Т12 и 1913-Т3, значения МКК

не превышают 250 мкм. На сплавах 1424-ТГ1 и 1913-Т3 за период проведения испытаний МКК обнаружено не было (рис. 1).

Расслаивающая коррозия (РСК) была зафиксирована только на сплаве В96ЦЗп.ч.-Т12, которая после четырех лет испытаний с обливом составила 8 балл.

При оценке изменения механических свойств (испытания на осевое растяжение при 20°C) установлено, что потери прочностных свойств не превышают 15% после четырех лет натурно-ускоренных испытаний (рис. 2). Большие потери относительного удлинения получены для образцов, испытывавшихся с обливом, наибольшие потери – для сплава В96ЦЗп.ч.-Т12.

#### **Метод расчета интегрального коррозионного коэффициента**

Предлагается два метода расчета интегрального коэффициента: для стандартных образцов (метод А) и для конструктивных элементов, изготовленных из листовых алюминиевых сплавов (метод Б). Схема расчета интегрального коэффициента приведена на рис. 3.

##### *1. Расчет интегрального коэффициента*

###### *$K_{ксл}$ по методу А*

Для расчета интегрального коррозионного коэффициента  $K_{ксл}$  по методу А проводится оценка по показателям потери массы, глубине и характеру межкристаллитной коррозии, склонности к расслаивающей коррозии, глубине питтинговой коррозии, площади коррозионных поражений и максимальному диаметру коррозионных очагов.

Анализ внешнего вида поверхности образцов с определением площади пораженной поверхности, а также диаметра коррозионных поражений проводят с помощью оптического микроскопа или визуальным методом. Измерение глубины питтинговой коррозии проводят по ГОСТ 9.908–85 [10] неразрушающими методами контроля [11] либо с помощью изготовления металлографического шлифа. Значения факторов глубины и площади поражения приняты как равнозначные (по влиянию на изменение механических свойств). Коэффициент общей коррозии (П) выбирают в соответствии с табл. 2.

Оценку удельной потери массы проводят путем измерения массы образцов на аналитических весах с точностью до 0,0001 г до и после испытаний, вычисления проводят по ГОСТ 9.908–85. Коэффициент потери массы (С) выбирают в соответствии с табл. 3.

Оценку глубины и характера распространения МКК проводят по ГОСТ 9.021–74 [12] с помощью металлографического микроскопа с точностью до 0,01 мм. При градации учитывается большее значение глубинного фактора с точки зрения его наибольшего влияния на снижение прочностных свойств. Коэффициент МКК (М) выбирают в соответствии с табл. 4.

Таблица 1

Количество хлоридов на поверхности образцов в сопоставлении с размером коррозионных очагов и потерями массы после 4 лет испытаний

Сплав	% поражения поверхности (максимальный диаметр коррозионных очагов), мм		Количество осажденных Cl, мг/(м <sup>2</sup> ·сут)		Потери массы, г/м <sup>2</sup>	
	без облива	с обливом	без облива	с обливом	без облива	с обливом
1424-ТГ1, 1913-Т3	40–70 (2–3 мм)	80–95 (3–5 мм)	2,62	2,99–5,11	4,61–13,04	13,32–23,12
В-1469-Т1, В-1461-Т1, В96Ц3п.ч.-Т12	90–100	100	3,24–7,0	4,05–11,3	10,54–42,3	30,65–61,86

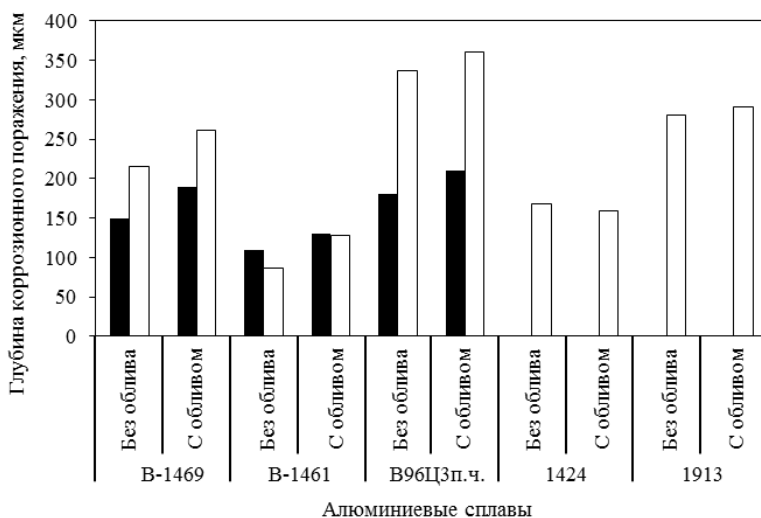


Рис.1. Глубина межкристаллитной и питтинговой коррозии алюминиевых сплавов после четырех лет испытаний (■ – МКК; □ – питтинг)

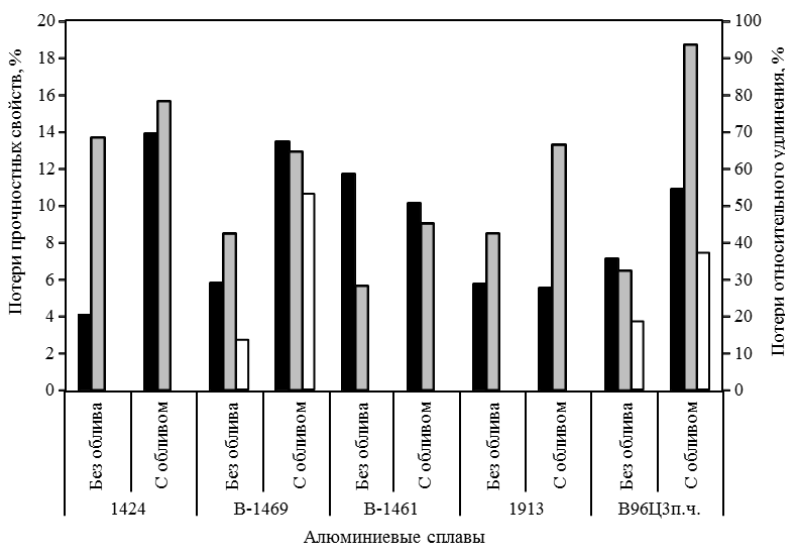


Рис. 2. Потери механических свойств (■ – σ<sub>y</sub>; □ – σ<sub>0,2</sub>; ■ – δ) алюминиевых сплавов после четырех лет натурно-ускоренных испытаний



Рис. 3. Принципиальная схема расчета интегрального коррозионного коэффициента по методам А и Б

Таблица 2

**Градация значений максимальной глубины питтинга**

Площадь коррозионных поражений (максимальный диаметр коррозионного очага*, мм)	Глубина питтинга, мкм				
	0–50	50–100	100–250	250–400	>400
I <10% ОК (1–1,5)	П1	П2	П3	П3	П3
II 15–30% ОК (1,5–3)	П2	П2	П3	П4	П4
III 35–50% ОК (2–5)	П2	П3	П4	П4	П4
IV 55–75% ОК (3–7)	П3	П3	П4	П5	П5
V >80% ОК (>5–8)	П3	П4	П5	П5	П5

\* При максимальном диаметре очага коррозии (ОК) меньше/больше соответствующей площади поражения проводить уменьшение/увеличение на одну позицию.

Таблица 3

**Градация значений удельной потери массы материала**

Коэффициент потери массы	Величина потери массы, г/м <sup>2</sup>
C1	0–5
C2	5–10
C3	10–20
C4	20–30
C5	>30

Таблица 4

**Градация значений глубины межкристаллитной коррозии (МКК)**

Характер распространения МКК по краю микрошлифа (с одной стороны)*	Глубина МКК, мм				
	0	0–0,1*	0,1–0,25	0,25–0,4	>0,4
I МКК отсутствует	M1	–	–	–	–
II Единичные очаги МКК (3–5 шт.)	–	M1	M2	M3	M4
III Очаги МКК в общей сложности занимают менее половины протяженности края микрошлифа	–	M1	M2	M3	M4
IV Множественные очаги МКК	–	M2	M3	M4	M5
V Непрерывное распространение МКК по всему краю микрошлифа	–	M2	M3	M5	M5

\* При глубине МКК меньше/больше соответствующего характера распространения МКК проводить уменьшение/увеличение на одну позицию.

Вычисление интегрального коэффициента коррозионной стойкости  $K_{кc1}$  проводят с помощью табл. 5 и 6. Оценку склонности сплава к расслаивающей коррозии проводят в соответствии с ГОСТ 9.904–82 (по 10-балльной шкале) [13]. В табл. 7 представлена расшифровка значений  $K_{кc}$ . Наибольшей степени коррозионного поражения соответствует наибольшее значение интегрального индекса коррозионного коэффициента.

Проведено определение индекса  $K_{кc1}$  для исследованных алюминиевых сплавов (табл. 7). По результатам интегральной оценки установлено, что наибольшей коррозионной стойкостью по результатам 4 лет натурно-ускоренных испытаний (что эквивалентно ~15 годам экспозиции на открытой площадке) по совокупности коррозионных потерь обладают сплавы 1424-ТГ1 и 1913-Т3, средней – В-1469-Т1, В-1461-Т1 и В96ЦЗп.ч.-Т12. Приведенный в табл. 7 коэффициент ускорения рассчитан как соотношение времени до коррозионного разрушения, соответствующего определенному индексу  $K_{кc1}$ , при испытаниях с обливом и без облива.

По результатам четырех лет натурно-ускоренных испытаний, а также анализа многолетней экспозиции образцов алюминиевых сплавов в условиях умеренно теплого климата установлены значения потерь механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0.2}$ ,  $\delta$ ), соответствующие индексу интегрального коэффициента по шкале от 1 до 7 (табл. 8, рис. 4).

## 2. Расчет интегрального коэффициента $K_{кc2}$ по методу Б

В настоящее время отсутствуют методы определения глубины МКК неразрушающими методами контроля с высокой точностью измерения, которые можно было бы использовать при проведении плановых осмотров изделий авиационной техники. Однако проведенные исследования показывают, что вихретоковый метод контроля может быть использован для контроля МКК в алюминиевых сплавах. Некоторые источники научно-технической литературы также подтверждают, что вихретоковый контроль применим для обнаружения коррозионных поражений, так как развитие коррозионных дефектов в полуфабрикате вызывает изменение электромагнитных характеристик материала: плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта. К особенностям вихретокового метода относят то, что на сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами [14].

Вихретоковый метод основан на возбуждении электромагнитным полем вихревых токов в электропроводящем материале и регистрации изменений результирующего электромагнитного поля,

вызванного наличием коррозионных поражений. Создание и регистрация изменений электромагнитного поля осуществляется вихретоковым преобразователем. Вихретоковый метод позволяет выявить несплошности материала, вызванные коррозией различных видов: расслаивающей, межкристаллитной, питтинговой, а также выявить коррозионное растрескивание.

Преимущества метода состоят в отсутствии необходимости специальной подготовки образца и возможности оценки глубины коррозионных поражений неразрушающим методом контроля. При оценке глубины коррозионных поражений определяется толщина материала, не подвергнутого коррозионному разрушению (рис. 5).

По результатам исследований образцов из сплавов 1913-Т3 и 1424-ТГ1, не подверженных МКК, вихретоковый метод контроля показал отсутствие коррозионных поражений. Для остальных сплавов вихретоковый метод оценки позволил установить глубину коррозионно-поврежденного слоя материала (рис. 6). Видно, что глубина коррозионных поражений, определенная вихретоковым методом ( $h_{вихр}$ ), в разной степени соотносится с реальной глубиной МКК в очаге разрушения ( $h_{МКК}$ ). Это дает основание полагать, что существует зависимость соответствия величин  $h_{вихр}$  и  $h_{МКК}$  от характера распространения МКК для разных сплавов – величины зерна, наличия «растратов» приповерхностных слоев и размера коррозионных очагов.

Перспектива применения вихретокового контроля состоит в установлении коэффициентов соответствия  $h_{вихр}$  реальной глубине МКК для каждого сплава с целью последующего применения вихретоковой дефектоскопии для неразрушающего контроля МКК в конструкциях из алюминиевых сплавов.

Для расчета коэффициента  $K_{кc2}$  листовых деформируемых алюминиевых сплавов, примененных в качестве конструкционного материала в изделии, оценка проводится по показателям питтинговой коррозии (наличие и максимальный очаг определяются капиллярным методом контроля), межкристаллитной коррозии (наличие МКК определяется с помощью вихретокового контроля) и склонности к расслаивающей коррозии.

Измерение глубины питтинга предпочтительно проводить неразрушающими методами контроля – например, лазерной сканирующей микроскопией, так как данный метод позволяет оценить глубину очага с гораздо большей точностью по сравнению с металлографическим методом.

Глубина и характер МКК оценивается по ГОСТ 9.021–74.

Склонность к РСК оценивается в баллах по ГОСТ 9.904–82. В работе [15] показано, что определенная лабораторным методом (в растворе по

Таблица 5

## Промежуточный индекс потери массы и глубины питтинга X

Коэффициент общей коррозии	C1	C2	C3	C4	C5
П1	X1	X1	X2	X2	X2
П2	X2	X2	X2	X3	X3
П3	X3	X3	X4	X4	X5
П4	X4	X4	X4	X5	X5
П5	X4	X4	X5	X5	X5

Таблица 6

Интегральный коррозионный коэффициент  $K_{kc}^*$ 

Коэффициент МКК	X1	X2	X3	X4	X5
M1	1	1	2	2	2
M2	2	2	2-3	3	3
M3	3	3	4	4	4
M4	4	4	5	5-6	6
M5	5	5-6	6	7	7

\* При наличии РСК (3 балл) индекс  $K_{kc}$  уменьшить на единицу; при РСК свыше 6 балла – на две единицы; при РСК, соответствующей 9 и 10 баллам, значение интегрального коэффициента принимают максимальным.

Таблица 7

## Интегральный коррозионный коэффициент алюминиевых сплавов после 1; 2 и 4 лет натурно-ускоренных испытаний без облива и с обливом раствором морской соли с концентрацией 5 г/л

Сплав	Интегральный коррозионный коэффициент $K_{кc1}$						Коэффициент ускорения
	при испытании без облива			при испытании с обливом раствором морской соли			
	в течение, годы						
	1	2	4	1	2	4	
1424-ТГ1	K1	K1	K2	K1	K1	K2	0
В-1469-Т1	K4	K4	K4	K4	K4	K4	0
В-1461-Т1	K2	K2	K3	K3	K3	K3	4
В96Ц3п.ч.-Т12	K3	K3	K3	K3	K4	K5	>4
1913-Т3	K1	K1	K2	K2	K2	K2	4

Таблица 8

## Соответствие индекса интегрального коэффициента диапазону прочностных потерь

$K_{кc1}$	$\Delta\sigma_B$	$\Delta\sigma_{0,2}$	$\Delta\delta$
K1	3,8±1,2	1,6±1,0	28,8±2,8
K2	6,4±1,2	2,3±1,0	36,1±2,8
K3	8,6±1,2	4,8±1,0	47,2±2,8
K4	10,6±1,2	6,6±1,0	49,3±2,8
K5	11,4±1,2	7,3±1,0	50,1±2,8
K6	15,7±1,2	9,8±1,0	65,9±2,8
K7	20,7±1,2	12,2±1,0	61,4±2,8

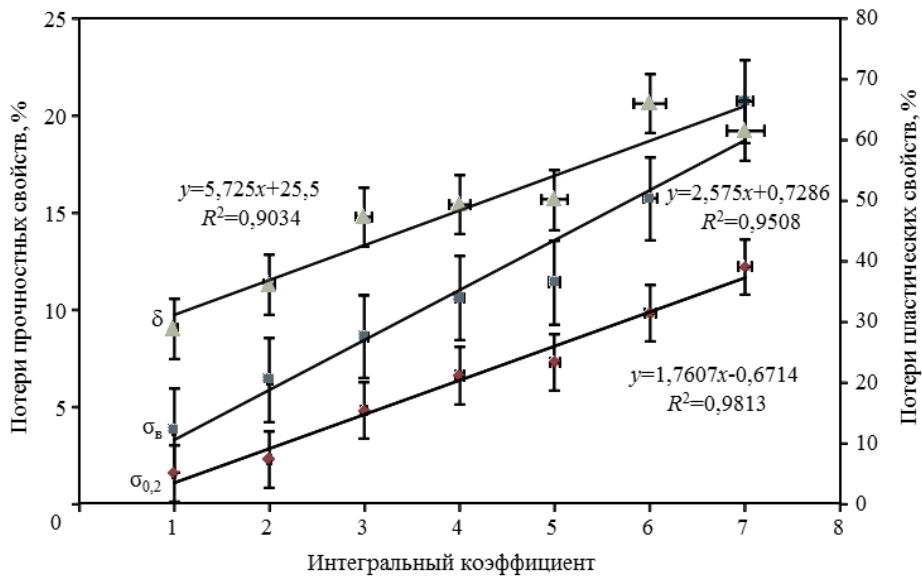


Рис. 4. Соответствие индекса интегрального коэффициента потерям механических свойств

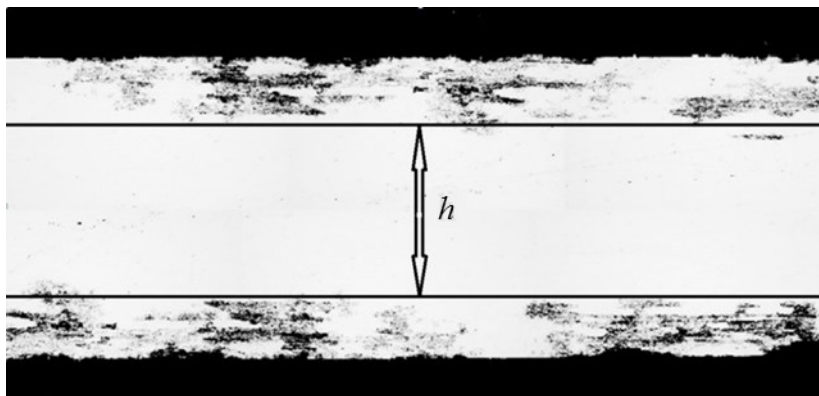


Рис. 5. Измерение толщины коррозионно-поврежденного слоя образца из листа алюминиевого сплава вихрековым методом

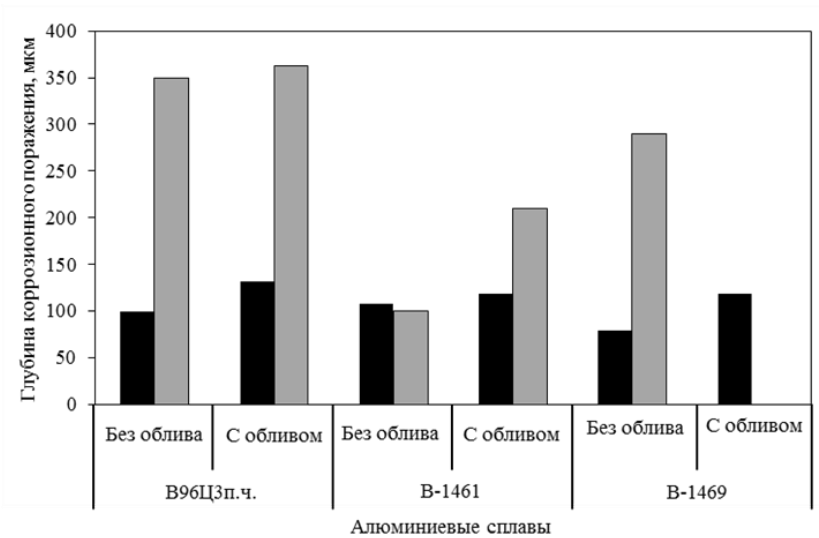


Рис. 6. Глубина МКК, определенная вихрековым (■) и металлографическим (■) методами

Таблица 9

Градации значений глубины питтинга для расчета коэффициента  $K_{к2}$ 

Коэффициент питтинга	Глубина очага коррозии, мкм
П1	0–50
П2	50–100
П3	100–250
П4	250–400
П5	>400

Таблица 10

Интегральный коррозионный коэффициент  $K_{к2}$ \*

Коэффициент МКК	П1	П2	П3	П4	П5
М1	1	1	2	2	2
М2	2	2	2–3	3	3
М3	3	3	4	4	4
М4	4	4	5	5–6	6
М5	5	5–6	6	7	7

\* При наличии РСК (3–5 балл) индекс  $K_{к2}$  уменьшить на единицу, при РСК свыше 6 балла – на две единицы.

ГОСТ 9.904–82) склонность к РСК в некоторой степени коррелирует с результатами двух лет натурно-ускоренных испытаний. Однако опасность данного вида коррозии заключается в том, что она (в отличие, например, от МКК) не тормозится со временем, и видно увеличение расслаивающей коррозии с увеличением срока экспозиции.

При определении индекса МКК по методу Б предлагается использовать значения, полученные на образцах-свидетелях из алюминиевого сплава, идентичного по толщине листа, составу и термической обработке материалу, примененному в конструкции, по результатам натурно-ускоренных испытаний после прекращения роста глубины коррозии (для исследованных алюминиевых сплавов этот срок составил порядка 6–12 мес).

Для расчета по методу Б градацию значений глубины питтинга проводят в соответствии с табл. 9. Расчет интегрального коэффициента  $K_{к2}$  проводят по индексам М и П с поправкой на РСК (табл. 10).

Таким образом, при оценке параметров коррозионного разрушения в конструкциях из алюминиевых сплавов (при нарушении защитного слоя покрытия) с использованием неразрушающих методов контроля возможно оценить диапазон прочностных потерь в месте разрушения конструкции, соответствующих рассчитанному интегральному коэффициенту. Впоследствии полученная информация послужит основой принятия решения о проведении ремонтных операций либо замене конструктивного элемента. В целом комплекс данных мероприятий позволит повысить эффективность предупреждающих мер по обнару-

жению и своевременному ремонту/замене потенциально опасных элементов конструкций, подвергнутых в процессе эксплуатации коррозионному разрушению, которые могут повлиять на снижение несущей способности (ресурса) конструктивного элемента.

#### Обсуждение и заключения

Показано, что методика проведения натурно-ускоренных испытаний образцов на атмосферном стенде в горизонтальном положении под навесом с распылением раствора морской соли обуславливает иницирование и ускорение коррозионного процесса в ~4 раза по сравнению с испытаниями в открытой атмосфере.

Разработана методика расчета интегрального коррозионного коэффициента двумя методами: для образцов алюминиевых сплавов после натуральных, натурно-ускоренных или имитационных испытаний (метод А) и для конструкций с применением неразрушающих методов контроля (метод Б). По результатам четырех лет натурно-ускоренных испытаний установлены диапазоны потерь механических свойств ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ), соответствующие индексу интегрального коэффициента по шкале от 1 до 7 для листовых деформируемых алюминиевых сплавов.

Установлено, что наибольшей коррозионной стойкостью после четырех лет натурно-ускоренных испытаний (~15 лет натуральных) обладают сплавы 1424-ТГ1 и 1913-Т3 (К1 и К2), средней – В-1461-Т1, В-1469Т1, В96ЦЗп.ч.-Т12 (К3–5).



## 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. 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.
4. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №7. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.01.2016). DOI: 10/18577/2307-6046-2014-0-7-10-10.
5. 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.
6. 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.
7. Жирнов А.Д., Стрекалов П.В., Каримова С.А., Жиликов В.П., Тарараева Т.И., Мищенко Е.Н. Сезонная динамика процесса коррозии металлов на береговой зоне Черного моря // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. №8. С. 23–29.
8. 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.
9. Курс М.Г., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Морозова Л.В. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Ч. 1 // *Вопросы материаловедения*. 2016. №1 (85). С. 116–126.
10. ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости / Гос. комитет СССР по стандартам. М., 1985. 17 с.
11. Исходжанова И.В., Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Лаптева М.А. Применение метода конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для исследования коррозионных повреждений // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №4. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.12.2015). DOI: 10/18577/2307-6046-2015-0-4-11-11.
12. 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.
13. 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.
14. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
15. Курс М.Г., Фомина М.А. Исследование закономерностей коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натуральных испытаниях // *Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов: сб. докл. конф.* М.: ВИАМ, 2015. С. 21.