УДК 620.193.21

**Прогнозирование потерь прочностных свойств листовых деформируемых алюминиевых сплавов с применением интегрального коэффициента коррозионного разрушения**

**Forecasting of strength property losses of sheet wrought
aluminium alloys using integral coefficient of corrosion damage**

Курс М.Г.1; Антипов В.В. 1, к.т.н.; Кутырев А.Е. 1, к.х.н.

Kurs Maria, Antipov Vladislav, Kutyrev Aleksey

KursMG@viam.ru

1*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) (ГЦКИ ВИАМ
им. Г.В. Акимова)*

***Аннотация:***

В работе представлены два метода расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения листовых деформируемых алюминиевых сплавов с установленными диапазонами потерь механических свойств (σв, σ0,2, δ), соответствующие индексу интегрального коэффициента по шкале от 1 до 7.

***Ключевые слова:***

интегральный коэффициент, алюминиевые сплавы, коррозия, натурно-ускоренные испытания.

***Summary:***

The paper presents two methods of computing integral figure of sheet wrought aluminium alloy damage with established ranges of mechanical property loss (σв, σ0,2, δ) corresponding to the index of integral figure on a scale from 1 to 7.

***Keywords:***

integral figure, aluminium alloys, corrosion, full-scale accelerated tests.

***Реферат***

На основе результатов 4х-летней экспозиции восьми алюминиевых сплавов (листы толщиной ~2 мм) при испытаниях натурно-ускоренным методом разработана методика расчета интегрального коэффициента коррозионного разрушения двумя методами: для образцов алюминиевых сплавов после натурно-ускоренных (метод А) и для конструкций с применением неразрушающих методов контроля (метод Б).

Применение комплексного метода исследования коррозионной стойкости алюминиевых сплавов и расчета интегрального коэффициента позволит проводить оценку прочностных потерь конструкций из листовых деформируемых алюминиевых сплавов при их коррозионном повреждении в процессе эксплуатации.

***Abstract:***

Based on the results of 4-year exposure of eight aluminium alloys (2 mm thick plates) by full-scale accelerated tests procedure for calculating integral figure of corrosion damage was designed with two methods: for samples of aluminium alloys after full-scale accelerated tests (method A) and for constructions using nondestructive control methods (method B).

Using integral method of corrosion resistance investigation of aluminium alloys and calculation of integral figure will allow to estimate strengthening losses of constructions made of sheet wrought aluminium alloys in the case of their corrosion damage while in operation.

**Введение**

Изготовление из алюминиевых сплавов ответственных несущих деталей воздушных судов требует исключения даже минимальных рисков потери прочности и несущей способности материала конструкции. К приоритетным задачам современного материаловедения относится проведение климатических испытаний алюминиевых сплавов с комплексной оценкой изменения свойств для обеспечения безопасности эксплуатации изделий АТ [1, 2].

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 [3].

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 настоящей 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 [4]. 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 потерь 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 АТ.

**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 [5–6]. В настоящей работе испытания проводились в ГЦКИ ВИАМ им. Г.В. Акимова [7], 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 процесс климатических испытаний более контролируемым и независимым от колебания метеопараметров. Для предотвращения стекания наносимого раствора и увеличения продолжительности увлажнения поверхности было выбрано горизонтальное расположение образов на атмосферном стенде.

Сроки экспозиции установлены по геометрической прогрессии в соответствии с ГОСТ 9.905-82: 3, 6 мес., 1, 2, 4 года. В период отрицательных температур облив образцов не проводился (что в условиях умеренно теплого климата ГЦКИ составляет не более 20 дней в году).

Экспозиция образцов проводилась без облива и с ежедневным однократным нанесением мелкодисперсного раствора морской соли в концентрации 5 г/л методом распыления.

Для испытаний были применены листы толщиной ~2 мм деформируемых алюминиевых сплавов систем Al-Cu-Li (сплавы В-1461Т1, В-1469Т1), Al-Zn-Mg (1913Т3), Al-Zn-Mg-Cu (В96ц3пчТ12), Al-Mg-Li (1424ТГ1).

**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 (таблица 1). При испытаниях с обливом количество хлоридов на поверхности образцов и скорость коррозии в 2-4 раза больше по сравнению с образцами без облива.

Таблица 1

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

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Сплавы | % поражения поверхности и max Ø корр. очагов, мм | Количество осажденных Cl, мг/м2сут. | Потери массы, г/м2 |
| Без облива | С обливом | Без облива | С обливом | Без облива | С обливом |
| 1424Т1, 1913Т3,В-1341Т1 | 40÷70%Ø 2-3 мм | 80÷95% Ø 3-5 мм | 2,62 | 2,99÷5,11 | 4,61÷13,04 | 13,32÷23,12 |
| В-1469Т1, 1441Т1,В-1461Т1, 1370Т1,В96ц-3пчТ12 | 90÷100% | 100% | 3,24÷7,0 | 4,05÷11,3 | 10,54÷42,3 | 30,65÷61,86 |

При оценке склонности сплавов к межкристаллитной и питтинговой коррозии установлено, что после 4х лет натурно-ускоренных испытаний (что эквивалентно ~ 15 годам натурных) наибольшие значения глубины питтинга характерны для сплавов В96ц3пчТ12 и 1913Т3, наибольшие значения МКК – для 1441Т1 и 1370Т1 (рис. 1). На сплавах 1424Т1 и 1913Т3 за период проведения испытаний МКК обнаружено не было.

Рис. 1 – Глубина межкристаллитной и питтинговой коррозии алюминиевых сплавов после 4х лет натурно-ускоренных испытаний.

Расслаивающая коррозия (РСК) была зафиксирована на 3-х сплавах из 8-ми: для сплава 1441Т1 и В96ц3пчТ12 после 4х лет испытаний с обливом РСК составила 8 баллов. Для В-1341Т1 начало развития РСК зафиксировано только после 3х лет натурно-ускоренных испытаний, после 4 лет экспозиции склонность к РСК составила 6 баллов.

При оценке изменения механических свойств (испытания на осевое растяжение при 200) установлено, что потери прочностных свойств не превышают 15-20 % после 4х лет натурно-ускоренных испытаний, за исключением сплава 1441Т1, для которого получила развитие МКК и РСК (рис. 2). Наибольшие потери мех.свойств характерны для сплавов, склонных к МКК (1370Т1, 1441Т1) и РСК (В96ц3пчТ12, 1441Т1). Наименьшие потери мех.свойств получены для сплава 1913Т3.

Рис. 2 – Потери механических свойств алюминиевых сплавов после 4х лет натурно-ускоренных испытаний

**Метод расчета интегрального коррозионного коэффициента.**

Предлагается 2 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.



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

**1. Расчет интегрального коэффициента Ккс1 по методу А**

Для расчета интегрального коррозионного коэффициента Ккс1 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. Подробный метод расчета по методу А приведен в [8].

Проведено определение индекса Ккс1 для исследованных алюминиевых сплавов (таблица 2). По результатам интегральной оценки установлено, что наибольшей коррозионной стойкостью по совокупности коррозионных потерь обладают сплавы 1424Т1 и 1913Т3, средней –
В-1469Т1, В-1341Т1, В-1461Т1, В96ц3пчТ12, низкой – 1370Т1 и 1441Т1. Приведенный в Таблице 2 коэффициент ускорения рассчитан как отношение времени до коррозионного разрушения, соответствующего определенному индексу Ккс1, при испытаниях с обливом по отношению к испытаниям без облива.

Таблица 2

Интегральный коррозионный коэффициент алюминиевых сплавов после
1, 2 и 4х лет натурно-ускоренных испытаний без облива и с обливом раствором морской соли в конц. 5 г/л

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Сплав | **Интегральный коррозионный коэффициент Ккс1** | **Коэф. ускорения** |
| Испытания без облива | Испытания с обливом 5 г/л |
| 1 г.  | 2 г.  | 4 г.  | 1 г.  | 2 г.  | 4 г.  |
| 1424Т1 | К1 | К1 | К2 | К1 | К1 | К2 | **0** |
| В-1469Т1 | К4 | К4 | К4 | К4 | К4 | К4 | **0** |
| В-1461Т1 | К2 | К2 | К3 | К3 | К3 | К3 | **4** |
| 1370Т1 | К3 | К5 | К5-6 | К5-6 | К5-6 | К6 | **4** |
| 1441Т1 | К3 | К4 | К4 | К6 | К6 | К7 | **>4** |
| В-1341Т1 | К1 | К2-3 | К4 | К2-3 | К2-3 | К3-4 | **2** |
| В96ц3пчТ12 | К3 | К3 | К3 | К3 | К4 | К5 | **>4** |
| 1913Т3 | К1 | К1 | К2 | К2 | К2 | К2 | **4** |

По результатам 4х лет натурно-ускоренных испытаний образцов алюминиевых сплавов были установлены значения потерь механических свойств (σв, σ0,2, δ), соответствующие индексу интегрального коэффициента по шкале от 1 до 7 (таблица 3, рис. 4).

Таблица 3

Соответствие индекса интегрального коэффициента диапазону прочностных потерь.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Δσв | Δσ0,2 | Δδ |
| К1 | 3,8±1,2 | 1,6±1,0 | 28,8±2,8 |
| К2 | 6,4±1,2 | 2,3±1,0 | 36,1±2,8 |
| К3 | 8,6±1,2 | 4,8±1,0 | 47,2±2,8 |
| К4 | 10,6±1,2 | 6,6±1,0 | 49,3±2,8 |
| К5 | 11,4±1,2 | 7,3±1,0 | 50,1±2,8 |
| К6 | 15,7±1,2 | 9,8±1,0 | 65,9±2,8 |
| К7 | 20,7±1,2 | 12,2±1,0 | 61,4±2,8 |

**потери пластических свойств, %**

Рис. 4 – Соответствие индекса интегрального коэффициента потерям
механических свойств

**2. Расчет интегрального коэффициента Ккс2 по методу Б**

Для расчета коэффициента Ккс2 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 [9]), т.к. данный метод позволяет оценить глубину очага с гораздо большей точностью по сравнению с металлографическим методом.

Глубина и характер МКК оценивается по ГОСТ 9.021.

Склонность к РСК оценивается в баллах по ГОСТ 9.904. В работе [10] показано, что определенная лабораторным методом (в растворе по ГОСТ 9.904) склонность к РСК в некоторой степени коррелирует с результатами 2х лет натурно-ускоренных испытаний. Однако вся опасность данного вида коррозии заключается в том, что она (в отличие, например, от МКК) не тормозится со временем, и мы видим увеличение расслаивающей коррозии с увеличением срока экспозиции. Потому при проведении осмотров конструктивных элементов изделий АТ необходимо уделять особое внимание конструкциям из алюминиевых сплавов, которые при проведении стендовых и лабораторных испытаний образцов показали склонность к РСК, т.к. даже небольшое повреждение покрытия может способствовать доступу активной среды и развитию РСК под покрытием. Среди алюминиевых сплавов наиболее подвержены РСК полуфабрикаты, применяемые в качестве силового набора планера, которые в составе конструкции часто находятся в скрытых и плохо вентилируемых полостях, что способствует образованию застойных зон.

На сегодняшний день отсутствуют методы определения глубины МКК неразрушающими методами контроля с высокой точностью измерения, которые можно было бы использовать при проведении плановых осмотров изделий АТ. Однако проведенные исследования показывают, что вихретоковый метод контроля может быть использован для установления факта наличия МКК в алюминиевых сплавах: по результатам исследований вихретоковый контроль показал наличие дефекта только на образцах, подверженных МКК.

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

Для расчета по методу Б градацию значений глубины питтинга проводят в соответствии с таблицей 4. Расчет интегрального коэффициента Ккс2 проводят по индексам М и П с поправкой на РСК (таблица 5).

Таблица 4

Градация значений максимальной глубины питтинга для расчета Ккс2.

|  |  |
| --- | --- |
| Коэффициент питтинга | Глубина корр. очага, мкм |
| П1 | 0÷50 |
| П2 | 50÷100 |
| П3 | 100÷250 |
| П4 | 250÷400 |
| П5 | > 400 |

Таблица 5

Интегральный коррозионный коэффициент Ккс2\*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **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 Ккс2 уменьшить на 1 единицу, при РСК свыше 6 балла – на 2 единицы.

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

**Выводы**

1. Показано, что методика проведения натурно-ускоренных испытаний образцов на атмосферном стенде в горизонтальном положении под навесом с распылением раствора морской соли обуславливает инициирование и ускорение коррозионного процесса в ~4 раза по сравнению с испытаниями в открытой атмосфере.
2. Разработана методика расчета интегрального коррозионного коэффициента двумя методами: для образцов алюминиевых сплавов после натурных, натурно-ускоренных или имитационных испытаний (метод А) и для конструкций с применением неразрушающих методов контроля (метод Б). По результатам 4х лет натурно-ускоренных испытаний установлены диапазоны потерь механических свойств (σв, σ0,2, δ), соответствующие индексу интегрального коэффициента по шкале от 1 до 7 для листовых деформируемых алюминиевых сплавов.
3. Установлено, что наибольшей коррозионной стойкостью после 4х лет испытаний обладают сплавы 1424Т1 и 1913Т3 (К1 и К2), средней –
В-1461Т1, В-1469Т1, В-1341Т1 и В96ц3пчТ12 (К3-5), наименьшей – 1370Т1 и 1441Т1 (К6-К7).

Литература

1. 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. С. 76–87.
2. 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.
3. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Расчетные характеристики металлических материалов с учетом влажности// Труды ВИАМ. 2014. № 7. С.10.
4. 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.
5. Семенычев В.В. Коррозионная стойкость листов сплава Д16ч.-Т в морских субтропиках // Труды ВИАМ. 2014. № 7. С.11 (viam-works.ru).
6. Жирнов А.Д., Стрекалов П.В., Каримова С.А., Жиликов В.П., Тарараева Т.И., Мищенков Е.Н. Сезонная динамика процесса коррозии металлов на береговой зоне Черного моря // Коррозия: материалы, защита. 2007. № 8. С. 23–29.
7. 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.
8. Курс М.Г. Обобщенный коэффициент коррозионной стойкости деформируемых алюминиевых сплавов//В сборнике: Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы. Сборник докладов II Всероссийской научно-технической конференции. ФГУП «ВИАМ». Москва, 2015. С. 16
9. Исходжанова И.В., Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Лаптева М.А. Применение метода конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для исследования коррозионных повреждений //Труды ВИАМ. 2015. № 4. Ст. 11 (viam-works.ru).
10. Курс М.Г., Фомина М.А. Исследование закономерностей коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натурных испытаниях// В сборнике [«Фундаментальные исследования и последние достижения в области литья, деформации, термической обработки и защиты от коррозии алюминиевых сплавов»](http://conf.viam.ru/?id_conf=76). Сборник докладов конференции. ФГУП «ВИАМ». Москва, 2015 г. С.21.