



УДК 629.7.018.4:620.193

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-10-10

## **РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВЛАЖНОСТИ**

**А.В. Гриневич**

*доктор технических наук*

**А.Н. Луценко**

*кандидат технических наук*

**С.А. Каримова**

*кандидат технических наук*

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

*А.В. Гриневич<sup>1</sup>, А.Н. Луценко<sup>1</sup>, С.А. Каримова<sup>1</sup>*

## **РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВЛАЖНОСТИ**

*Рассматривается проблема определения прочностных расчетных характеристик конструкционных металлических материалов в связи с новой редакцией Авиационных правил. Показано, что требования по учету влияния коррозионной среды включены в параграф, формулирующий требования по расчетным значениям прочностных характеристик. Предложен критерий коррозионной повреждаемости, позволяющий реализовать эффект «сжатия» времени, что дает основу для определения расчетных значений усталостной долговечности при воздействии коррозионной среды. Определен перечень прочностных характеристик, для которых целесообразно определять расчетные значения прочностных характеристик в условиях влажности.*

**Ключевые слова:** прочностные расчетные характеристики, коррозия, влажность.

*A.V. Grinevich, A.N. Lutsenko, S.A. Karimova*

## **THE DESIGN CHARACTERISTIC OF METALLIC MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT THE HUMIDITY**

*The problem of determining the design characteristics of structural metallic materials in connection with the new edition of Aviation Rules is considered. It is shown that the requirements for accounting for the influence of corrosion environments are included in the section laying down the requirements for the design values of strength properties. The criterion of damage to corrosion, which allows to realize the effect of «compression» of time, which provides the basis for the determination of the calculated values of the fatigue life when exposed to corrosive environment, is proposed. A list of the strength characteristics for which it is advisable to determine the estimated value of the strength characteristics of the humidity is established.*

**Keywords:** design characteristics, corrosion, moisture.

---

<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

Долговечность конструкции в процессе эксплуатации базируется на механических характеристиках конструкционных материалов и определяется не только механической повреждаемостью материала, но и уровнем его коррозионного поражения [1, 2]. В ряде случаев летательные аппараты снимались с эксплуатации в связи с коррозионными поражениями, критичными для безопасности изделий, значительно раньше расчетного ресурса, определенного исходя из характеристик усталостной долговечности материалов, полученных в лабораторных испытаниях при переменных напряжениях без воздействия влаги [3].

Необходимость учета коррозионных воздействий диктуется основным законом, которым руководствуются при проектировании авиационных конструкций, – Нормами летной годности [4]. В параграфе 25.603 (Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории), посвященном выбору материала, устанавливается, что «Пригодность и долговечность материалов, используемых для изготовления деталей, поломка которых может отрицательно повлиять на безопасность, должны:

- (а) Определяться по опыту или путем испытаний.
- (б) Соответствовать утвержденным техническим условиям (ТУ), гарантирующим прочность и другие свойства, принятые в расчетных данных.
- (в) Оцениваться с учетом влияния окружающих условий, ожидаемых в эксплуатации, таких, как температура и влажность».

Параграф 25.603 АП (Часть 25), затрагивая проблему коррозионного воздействия при эксплуатации авиационных конструкций, не регламентировал условия ее выполнения. Данное общее требование о необходимости учета влияния влажности конкретизировалось требованием параграфа 25.609 «Защита элементов конструкции», в котором указывается: «Каждый элемент конструкции должен быть:

- (а) Соответствующим образом защищен от снижения или потери прочности в процессе эксплуатации по любой причине, включая: (1) Атмосферные воздействия; (2) Коррозию; (3) Истирание.
- (б) Обеспечен достаточными средствами вентиляции и дренажирования, если это необходимо для защиты».

При сертификации самолета установление соответствия данным требованиям обеспечивалось на основе спецификации на изделие, в которой фиксировалась система защиты от коррозии для всех деталей, разрушение которых могло отрицательно повлиять на безопасность конструкции. Обоснованность выбора системы защиты определя-

лась компетентными в области коррозии авиационных материалов специалистами ВИАМ.

В последней редакции АП Часть 25 (2009 г.) в параграфе 25.613 «Прочностные характеристики материалов и их расчетные значения» впервые появилось требование по обоснованию расчетных значений с учетом влажности. Для исключения неточности при толковании данного параграфа приведем его максимально полно:

«(a) Прочностные характеристики материалов должны определяться на основании достаточного количества испытаний с тем, чтобы расчетные значения можно было устанавливать на основе статистики.

(b) Расчетные значения следует выбирать таким образом, чтобы уменьшить вероятность разрушений конструкции из-за непостоянства свойств материалов. За исключением требований, приведенных в пунктах (e) и (f) настоящего параграфа, соответствие должно быть показано путем выбора расчетных значений, которые обеспечивают прочность материала со следующей вероятностью:

(1) 99% – с 95%-ным доверительным интервалом, когда приложенные нагрузки передаются через единичный элемент агрегата, разрушение которого приводит к потере конструктивной целостности агрегата.

(2) 90% – с 95%-ным доверительным интервалом для статически неопределимой конструкции, в которой разрушение любого отдельного элемента приводит к тому, что приложенные нагрузки безопасно распределяются по другим несущим элементам.

(c) Должно учитываться влияние условий окружающей среды, таких как температура и влажность, на расчетные значения применяемых в ответственных элементах или узлах конструкции материалов, если в диапазоне условий эксплуатации самолета это влияние является существенным».

Впервые в требованиях по определению расчетных значений прочностных характеристик в последней редакции АП Часть 25 (2009 г.) установлено требование по учету влажности.

Новая формулировка параграфа по оценке расчетных значений прочностных характеристик ставит крайне сложную задачу перед конструкторами, поскольку не разработаны методики оценки воздействия влажности на прочностные характеристики металлических материалов. Этот факт приходится учитывать на фоне огромного числа исследований по влиянию коррозионной среды на металлические материалы. Причина кроется не столько в многообразии механизмов коррозионного поражения, сколько в невозможности при лабораторных испытаниях воспроизвести временные условия кор-

розионных воздействий, имеющих место в эксплуатации. Ускорение коррозии путем использования более агрессивной среды и температурного фактора меняют механизм коррозии и приводят к необоснованно завышенным коррозионным поражениям. Методики по оценке сопротивления материалов коррозионным воздействиям только ранжируют материалы в некоторый ряд, но не дают основание для оценки расчетных значений прочностных характеристик. Даже прямые испытания материалов при совместном воздействии переменных нагрузок и коррозионной среды не позволяют дать оценку расчетным значениям прочностных характеристик, поскольку продолжительность механических испытаний недостаточна для реализации коррозионных процессов, имеющих место при длительной эксплуатации.

Под расчетными характеристиками материалов понимаются прочностные характеристики, позволяющие определить предельные состояния конструкции [5, 6].

Предельные состояния возникают при действии статических и переменных нагрузок, а также при наличии трещиноподобных дефектов. Предельные состояния конструкции определяются при прямых испытаниях конструкции, которые могут быть выполнены на крайне ограниченном объеме экземпляров. Опирается пирамида испытаний (рис. 1) на огромное число испытаний стандартных образцов, что позволяет оценить ряд факторов (влияние температуры и коррозионной среды, разброс свойств материалов, различные схемы механической обработки и др.), которые невозможно определить при испытаниях натурной конструкции.

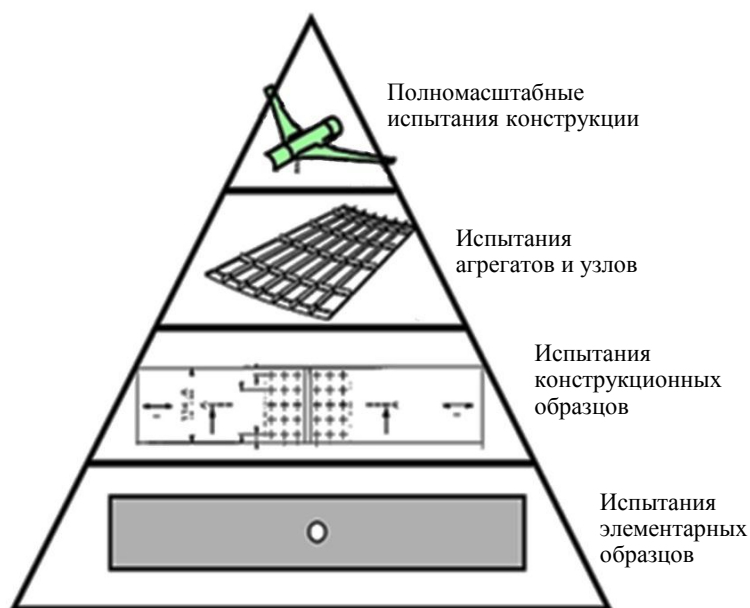


Рисунок 1. Пирамида испытаний, обосновывающая правомерность применения материала в конструкции

Оценка критического состояния материала в статически нагружаемой конструкции базируется на характеристиках материала, полученных при статических испытаниях стандартных образцов.

Расчетными характеристиками материалов при статическом нагружении являются: предел прочности при растяжении ( $\sigma_B$ ); условные пределы текучести при растяжении и сжатии с допуском на остаточную деформацию 0,2% ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{0,2сж}$ ); предел прочности при смятии и предел текучести с допуском на овализацию 2% ( $\sigma_{в,см}$ ,  $\sigma_{2см}$ ); сопротивление сдвигу ( $\tau$ ); модуль нормальной упругости ( $E$ ); относительное удлинение после разрыва ( $\delta$ ); коэффициент Пуассона ( $\mu$ ). Данные характеристики являются основными характеристиками материала для оценки статической прочности конструкции при отсутствии температурных воздействий, которые могут повлиять на статическую прочность материала, а также привести к явлению ползучести.

В американском справочнике Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-02) прочностные характеристики ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{0,2сж}$ ,  $\sigma_{в,см}$ ,  $\sigma_{2см}$ ,  $\tau$ ) приводятся со статической оценкой, т. е. по базису  $A$  и  $B$ . Однако для ряда полуфабрикатов данные характеристики приводятся по базису  $S$  (эквивалент отечественных технических условий на материал). Характеристики  $E$  и  $\mu$  в справочнике MMPDS-02 представлены типичными (средними) значениями (базис  $T$ ), а величина  $\delta$  – базисом  $S$ .

Для расчета на прочность воздушного судна необходимы и физические параметры материалов: плотность, теплопроводность, теплоемкость и др., которые в справочнике MMPDS-02 представлены типичными значениями.

При действии на конструкцию переменных нагрузок, которые определяют ее ресурс, основными расчетными характеристиками материала являются характеристики усталостной долговечности. Результаты испытаний на усталостную долговечность обычно приводятся в виде зависимости  $N-f(\sigma)$  (напряжение–число циклов до разрушения). Для получения кривой усталости, которая строится по точкам, полученным при определенном шаге изменения нагрузки, американские нормы рекомендуют от 8 до 16 образцов. Поскольку для оценки усталостной долговечности материала крайне важно соотношение амплитуды и постоянной нагрузки цикла, то оценка усталости проводится при разном коэффициенте асимметрии цикла. Рекомендуемое количество образцов при этом возрастает до 48 штук. Крайне важной является оценка усталостной долговечности материала при разных концентраторах напряжения. Алюминиевые сплавы, составляющие основу планера самолета, испытываются в условиях управления по нагрузке («мягкий» цикл нагружения) при разных концентраторах напряжения.

Отечественная практика рекомендует оценку усталостной долговечности на двух или трех уровнях нагрузки с испытанием на каждом порядка 15 образцов. По этим двум или трем базам определяются коэффициенты зависимости «напряжение–число циклов до разрушения», которая в логарифмических координатах в диапазоне  $10^3$ – $10^5$  циклов нагружения представляется прямой линией.

Не рассматривая преимущества и недостатки данных подходов при оценке усталостных характеристик материала, следует отметить, что в последней редакции АП Часть 25 (2009 г.) вводятся требования по статистической оценке характеристик усталости. Ранее подобные требования к характеристикам усталостной долговечности не выдвигались, а общий подход к оценке усталости и допустимой повреждаемости излагался в параграфе 25.571 АП Часть 25 «Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции».

Параграф 25.571 АП Часть 25 гласит – «оценка прочности, уровня проектирования и качества производства должна показать, что аварийной или катастрофической ситуации из-за усталости, коррозии, дефектов производства или случайного повреждения можно избежать в течение всего времени эксплуатации самолета».

В последней редакции АП Часть 25 требования по оценке расчетных значений появились в параграфе 25.613, отвечающем за расчетные характеристики и статистическое представление их расчетных значений. Пункт «d» параграфа 25.613 указывает, что «для обеспечения возможности выполнения расчетных оценок в соответствии с требованиями параграфа 25.571 должны быть определены номенклатура и статистически обоснованные уровни расчетных характеристик усталости и трещиностойкости материалов конструкции».

Следовательно, наряду с кривой усталости, представляющей средние значения усталостной долговечности, должны быть представлены статистически обоснованные показатели усталостной долговечности с заданным уровнем усталостной прочности и величиной доверительной вероятности. Логично предположить, что статистически обоснованные уровни расчетных характеристик усталости уже определены пунктом (b) параграфа 25.613, т. е. базисами *A* и *B*.

Оценка прочности конструкции при наличии трещиноподобных дефектов опирается на характеристики механики разрушения:  $K_{1c}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации,  $K_c$  – критический коэффициент интенсивности напряжений,  $K_c^{ysl}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений, рассчитанный по начальной длине трещины. В справочнике MMPDS-02 основная характе-

ристика вязкости разрушения  $K_{1c}$  (коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации) представлена минимальными, средними, максимальными значениями и коэффициентом вариации.

Рассмотрим расчетные характеристики материалов, для которых влияние влаги значимо. Оценка расчетных характеристик по определению статической прочности металлических материалов при воздействии влаги не представляется целесообразным, поскольку коррозионное повреждение является процессом существенно растянутым по времени, если не рассматривать поверхностно-активные эффекты. Попытки растянуть время нагружения до нескольких суток не являются рациональными, поскольку в лучшем случае эти оценки могут ранжировать материалы для конкретных условий испытаний. Для оценки статической прочности металлической конструкции определяющим фактором является динамика коррозионного поражения, обуславливающая степень уменьшения рабочего сечения материала. При этом величины расчетных значений статической прочности материала остаются неизменными.

Оценка расчетных значений усталостных характеристик при воздействии влаги является наиболее сложной задачей. Очевидно, что влага существенно влияет как на зарождение усталостной трещины, так и на ее развитие. На необходимость учета воздействия влаги на усталостные характеристики указывали еще Г.В. Акимов, один из основоположников отечественной науки о коррозии металлов, и его учитель В.О. Крениг [7, 8].

Вопрос коррозионной усталости затрагивался и в последующих работах [9, 10]. Тем не менее проблема остается нерешенной и в настоящее время. Основная сложность оценки расчетных характеристик усталости при воздействии влаги, как и в случае статических характеристик, состоит в нестыковке временных параметров. Усталостные испытания образцов выполняются в течение нескольких часов или суток. Механическая повреждаемость, реализованная за время усталостных испытаний, может характеризовать повреждаемость, получаемую металлом за длительный процесс эксплуатации. Характеристика усталостной механической повреждаемости не зависит от времени, и эквивалентность повреждаемости устанавливается по уровню циклических напряжений и количеству циклов с учетом продолжительности нагружения.

Коррозионное поражение – это процесс достаточно протяженный во времени, который не удастся сжать до нескольких суток. Ускоренные коррозионные испытания изменяют коррозионные условия, имеющие место в эксплуатации, и часто меняют механизм коррозионного поражения.

Проблема заключается в отсутствии критерия коррозионной повреждаемости, ко-

торый мог бы установить эквивалентность коррозионного воздействия. В ВИАМ проведены всесторонние исследования данной проблемы [12–18]. В качестве критерия коррозионного поражения предложена величина поверхностной плотности электрического заряда. Эксперименты по оценке усталостной долговечности образцов при варьировании величиной поверхностной плотности электрического заряда показали его правомерность. На рис. 2 приведены результаты испытаний плоских образцов (толщина листа 1,5 мм) из сплава 1163-АТВ на усталость. Плоский образец представлял собой пластину с центральным отверстием, что при отношении диаметра отверстия к ширине образца  $d/B=0,167$  обеспечивало коэффициент концентрации напряжений  $K_t=2,6$ . При одинаковом электрохимическом воздействии, но различной продолжительности воздействия получена одинаковая усталостная долговечность, что позволяет реализовать фактор «сжатия» времени, являющийся камнем преткновения для коррозионных испытаний. Предложенный критерий не только фиксирует степень повреждения металла, но и дает основание для введения коррозионного повреждения в эквивалентный цикл усталостного нагружения.

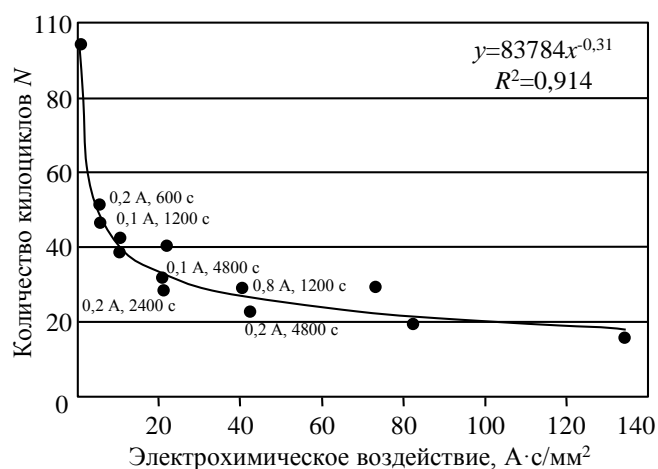


Рисунок 2. Изменение усталостной долговечности листов из сплава 1163-АТВ при различных электрохимических воздействиях

Выполненные изыскания дают основание для нахождения расчетных значений прочностных характеристик материала при совместном воздействии переменных нагрузок и коррозионной среды.

Группа прочностных расчетных характеристик объединяет характеристики механики разрушения. К ним следует отнести вязкость разрушения, определяемую в условиях статического нагружения, и скорость роста трещины усталости (СРТУ), отражающую кинетику развития трещины при переменных нагрузках. Механика разрушения

отражает процесс развития трещин в материале при воздействии переменных напряжений, учитывая коэффициент интенсивности напряжений в вершине развивающейся трещины. Нахождение зависимости СРТУ от коэффициента интенсивности напряжений –  $dl/dN=f(\Delta K)$  – дает возможность прогнозирования остаточного ресурса конструкции при наличии обнаруженной усталостной трещины. Однако ранжирование материалов по СРТУ при испытаниях в конкретной среде и при конкретных частотах испытаний не означает получения расчетных характеристик. При оценке СРТУ в коррозионной среде исследователи сталкиваются со спецификой коррозионного поражения, обусловленного его временным фактором, что приводит к различным значениям СРТУ при различной частоте испытаний. Авторы полагают, что критерий коррозионной повреждаемости позволит и в случае характеристик механики разрушения привести данные к единому показателю [19–22].

Временной характер воздействия коррозионной среды будет значимым и при приложении постоянной нагрузки для тела, содержащего трещиноподобный дефект. Коррозионное воздействие с течением времени изменит состояние металла в вершине трещины, что приведет к ее развитию. Пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений при воздействии коррозионной среды первоначально получило аббревиатуру  $K_{sc}$  (stress crack corrosion).

Для ряда материалов влага может оказаться поверхностно-активной средой, напрямую воздействующей на ювенильную поверхность развивающейся трещины. В этом случае воздействие влаги приведет к снижению критического коэффициента интенсивности напряжений и, как следствие, к уменьшению критической длины трещины. Прямой эксперимент с присутствием влаги при определении  $K_c$ ;  $K_c^{ycl}$  и  $K_{Ic}$  даст ответ на данный вопрос.

Резюмируя вышеизложенное, полагаем, что прочностными характеристиками для металлов, которые необходимы для определения прочности и надежности конструкции в условиях воздействия влаги, являются характеристики трещиностойкости и усталости, полученные с включением эквивалентной коррозионной повреждаемости в цикл усталостного нагружения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.

2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушных судов //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. №187. С. 83–91.
4. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. МАК: ОАО «Авиаиздат». 2009. 267 с.
5. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: Руководство и справ. пособ. М.: Машиностроение. 1975. 488 с.
6. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. М.: Машиностроение. 1985. 224 с.
7. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1945. 414 с.
8. Крениг В.О. Коррозия металлов. М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР. 1936. 304 с.
9. Коррозионная усталость металлов /Под ред. академика Я.М. Колотыркина. Киев: Наукова Думка. 1982. 371 с.
10. Улиг Г.Г., Ревы Р.У. Коррозия и борьба с ней. Л.: Химия. 1989. 455 с.
11. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
12. EUROCORR 2010: The European Corrosion Congress 2010 /In: European Federation of Corrosion Event. 2010. №324. 684 p.
13. Гриневич А.В., Жирнов А.Д., Каримова С.А. Прогнозирование усталостной долговечности металлических материалов при коррозионном воздействии /В сб. докладов конф. «Геленджик-2010». М.: ОНТИ ЦАГИ. 2010. С. 199–205.
14. 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.
15. Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Антипов В.В., Каримова С.А., Рудаков А.Г., Оглодков М.С. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 16–20.
16. Каримова С.А., Павловская Т.Г. Разработка способов защиты от коррозии конструкций, работающих в условиях космоса //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 02 (viam-works.ru).

17. Старцев О.В., Медведев И.М., Курс М.Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 16–19.
18. Махсидов В.В., Колобнев Н.И., Каримова С.А., Сбитнева С.В. Взаимосвязь структуры и коррозионной стойкости в сплаве 1370 системы Al–Mg–Si–Cu–Zn //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 8–13.
19. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Каримова С.А. Прочностные характеристики материалов планера самолетов в условиях влажности //Вопросы материаловедения. 2013. №1. С. 212–219.
20. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Долговечность изделий и коррозионная усталость конструкционных материалов //Вопросы материаловедения. 2013. №1. С. 220–229.
21. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Исследование остаточной усталостной долговечности алюминиевого сплава В95п.ч.-Т1 после экспозиции в различных условиях //Вопросы материаловедения. 2013. №2. С. 118–122.
22. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сеник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 14–16.

#### REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Ospennikova O.G. Strategija razvitija zharoprochnyh splavov i stalej special'nogo naznachenija, zashhitnyh i teplozashhitnyh pokrytij [The development strategy of superalloys and special steel, protective and thermal barrier coatings] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
3. Fejgenbaum Ju.M., Dubinskij S.V. Vlijanie sluchajnyh jekspluatacionnyh povrezhdenij na prochnost' i resurs konstrukcii vozдушnyh sudov [The effect of random damage to operational strength and resource aircraft design] //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. №187. С. 83–91.

4. Aviacionnye pravila. Chast' 25. Normy letnoj godnosti samoletov transportnoj kategorii [Aviation Regulations. Part 25. Airworthiness standards transport category airplanes]. MAK: OAO «Aviaizdat». 2009. 267 s.
5. Serensen S.V., Kogaev V.P., Shnejderovich R.M. Nesushhaja sposobnost' i raschet detalej mashin na prochnost' [Bearing capacity and settlement of machine parts for durability]: Rukovodstvo i sprav. posob. M.: Mashinostroenie. 1975. 488 s.
6. Kogaev V.P., Mahutov N.A., Gusenkov A.P. Raschety detalej mashin i konstrukcij na prochnost' i dolgovechnost' [Calculations of machine parts and structures for strength and durability]: Spravochnik. M.: Mashinostroenie. 1985. 224 s.
7. Akimov G.V. Teorija i metody issledovanija korrozii metallov [Theory and Methods of metal corrosion]. M.-L.: Izd-vo AN SSSR. 1945. 414 s.
8. Krenig V.O. Korrozija metallov [Metal corrosion]. M.-L.: ONTI NKTP SSSR. 1936. 304 s.
9. Korroziionnaja ustalost' metallov [Corrosion fatigue of metals] /Pod red. akademika Ja.M. Kolotyrkina. Kiev: Naukova Dumka. 1982. 371 s.
10. Ulig G.G., Revi R.U. Korrozija i bor'ba s nej [Corrosion and combating]. L.: Himija. 1989. 455 s.
11. Kablov E.N. Korrozija ili zhizn' [Corrosion or life] //Nauka i zhizn'. 2012. №11. S. 16–21.
12. EUROCORR 2010: The European Corrosion Congress 2010 /In: European Federation of Corrosion Event. 2010. №324. 684 p.
13. Grinevich A.V., Zhirnov A.D., Karimova S.A. Prognozirovanie ustalostnoj dolgovechnosti metallicheskih materialov pri korroziionnom vozdejstvii [Prediction of fatigue life of metallic materials under corrosion attack] /V sb. dokladov konf. «Gelendzhik-2010». M.: ONTI CAGI. 2010. S. 199–205.
14. Zhilikov V.P., Karimova S.A., Leshko S.S., Chesnokov D.V. Issledovanie dinamiki korrozii aljuminievych splavov pri ispytanii v kamere solevogo tumana (KST) [Study of the dynamics of corrosion of aluminum alloys when tested in the salt spray chamber (SSC)] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 18–22.
15. Hohlatova L.B., Kolobnev N.I., Antipov V.V., Karimova S.A., Rudakov A.G., Oglochkov M.S. Vlijanie korroziionnoj sredy na skorost' rosta treshhiny ustalosti v aljuminievych splavah [Effect of environment on corrosion fatigue crack growth rate in aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №1. S. 16–20.

16. Karimova S.A., Pavlovskaja T.G. Razrabotka sposobov zashhity ot korrozii konstrukcij, rabotajushhijh v uslovijah kosmosa [Development of methods of corrosion protection structures operating in space] //Trudy VIAM. 2013. №4. St. 02 (viam-works.ru).
17. Starcev O.V., Medvedev I.M., Kurs M.G. Tverdost' kak indikator korrozii aljuminievyh splavov v morskijh uslovijah [Hardness as an indicator of corrosion of aluminum alloys in marine environments] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 16–19.
18. Mahsidov V.V., Kolobnev N.I., Karimova S.A., Sbitneva S.V. Vzaimosvjaz' struktury i korrozionnoj stojkosti v splave 1370 sistemy Al–Mg–Si–Cu–Zn [Relationships between structure and corrosion resistance of the alloy system 1370 Al–Mg–Si–Cu–Zn] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 8–13.
19. Lucenko A.N., Grinevich A.V., Karimova S.A. Prochnostnye harakteristiki materialov planera samoletov v uslovijah vlazhnosti [Strength characteristics of materials glider aircraft in wet conditions] //Voprosy materialovedenija. 2013. №1. S. 212–219.
20. Grinevich A.V., Lucenko A.N., Karimova S.A. Dolgovechnost' izdelij i korrozionnaja ustalost' konstrukcionnyh materialov [Durability of products and corrosion fatigue of structural materials] //Voprosy materialovedenija. 2013. №1. S. 220–229.
21. Grinevich A.V., Lucenko A.N., Karimova S.A. Issledovanie ostatochnoj ustalostnoj dolgovechnosti aljuminievogo splava V95p.ch.-T1 posle jekspozicii v razlichnyh uslovijah [Investigation of the residual fatigue life of aluminum alloy V95p.ch.-T1 after exposure to different conditions] //Voprosy materialovedenija. 2013. №2. S. 118–122.
22. Erasov V.S., Grinevich A.V., Senik V.Ja., Konovalov V.V., Trunin Ju.P., Nesterenko G.I. Raschetnye znachenija harakteristik prochnosti aviacionnyh materialov [Calculated values of the strength characteristics of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 14–16.