

УДК 620.193

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-29-33

А.В. Гриневич¹, Г.А. Нужный¹, И.В. Гулина¹**ПОИСК КРИТЕРИЯ КОРРОЗИОННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ**

Рассматривается проблема коррозионной повреждаемости, во многом определяющая надежность и ресурс летательных аппаратов. Оценка данной характеристики закреплена в Авиационных правилах, требующих от разработчика воздушного судна определение расчетных значений прочностных характеристик с учетом воздействия влажности. Однако в настоящее время не разработаны методики определения расчетных значений прочностных характеристик металлических сплавов при воздействии коррозионной среды. Это обусловлено временной нестыковкой механических и коррозионных испытаний. Предложен критерий коррозионной повреждаемости, позволяющий сократить продолжительность коррозионного процесса, что открывает возможность совмещения коррозионных и механических воздействий.

Ключевые слова: коррозия, усталостная долговечность, расчетные характеристики.

The problem of corrosion damageability, which determines to a large extent a reliability and service life of aircrafts is considered. Evaluation of this characteristic is specified in Aviation regulations. They commit a developer of aircraft to carry out a definition of calculative values of strength characteristics taking into account a moisture effect. However, at present the techniques for definition of calculated values of metal alloys strength characteristics under the effect of corrosive environment have not been developed. It is conditioned by a temporal discrepancy of mechanical and corrosion tests. A criterion of corrosion damageability is proposed allowing to reduce a duration of corrosion process and makes it possible to combine corrosion and mechanical effects.

Keywords: corrosion, fatigue life, calculated characteristics.

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

Проблема коррозионной повреждаемости всегда являлась предметом пристального внимания органов по сертификации авиационной техники (АТ), поскольку эта характеристика во многом определяет надежность эксплуатации АТ. Требования о необходимости учета влияния влажности сформулированы в основном параграфе 25.603 (Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории), определяющем применение авиационного материала в конструкции.

Параграф 25.603 АП-25 декларирует, 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» [1].

Параграф 25.603 АП-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 АП-25 «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» [1].

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 определялась специалистами ВИАМ, компетентными в области коррозии авиационных материалов [2].

В последней редакции АП-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:

«(а) 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 (е) и (f) настоящего параграфа, соответствие данному параграфу должно быть показано путем выбора расчетных значений, которые обеспечивают прочность материала со следующей вероятностью:

(1) 99% с 95-процентным доверительным интервалом, когда приложенные нагрузки передаются через единственный элемент агрегата, разрушение которого приводит к потере конструктивной целостности агрегата;

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

(с) **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» [1].

Впервые в требованиях по определению расчетных значений прочностных характеристик в последней редакции АП-25 (2009 г.) установлено требование по учету воздействия 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 признать несмотря на огромное количество изысканий, проведенных по исследованию влияния коррозионной среды на металлические материалы [3].

Основная причина состоит во временной нестыковке механических испытаний и коррозионных процессов. Если оценка малоциклового усталости на базе 200000 циклов занимает 11–12 ч, то для начала коррозионного процесса требуется не менее 3 мес в камере солевого тумана. Ускорение коррозии за счет использования более агрессивной среды и температурного фактора меняет механизм коррозии и приводит к необоснованно повышенным коррозионным поражениям [4]. Методики по оценке сопротивления материалов коррозионному воздействию 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 [5–7].

Материалы и методы

Под расчетными характеристиками материалов понимаются прочностные характеристики, позволяющие определить предельное состояние конструкции. Предельные состояния возникают при действии статических и переменных нагрузок, приводящих к возникновению трещин, которые развиваются до критического размера, за которым происходит их лавинное развитие за счет энергии, накопленной в системе. Предельные состояния конструкции определяются при прямых испытаниях, которые могут быть выполнены на крайне ограниченном объеме экземпляров. Выбор материала и отработку технологий изготовления деталей проводят на стандартных образцах, на которых и определяют исходные расчетные значения характеристик прочности. 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 (σ_b); условные пределы текучести при растяжении и сжатии с допуском на остаточную деформацию 0,2% ($\sigma_{0,2}$; $\sigma_{0,2сж}$); пределы прочности при смятии с допуском на овализацию 2% ($\sigma_{в,см}$; $\sigma_{2см}$); сопротивление сдвигу (τ); модуль нормальной упругости при растяжении (E); относительное удлинение после разрыва (δ); коэффициент Пуассона (μ). Данные характеристики материала являются основными для оценки статической прочности конструкции [8, 9].

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». Параграф 25.571 АП-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». Пункт «d» параграфа 25.613 АП-25 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». Эти требования еще раз подчеркивают необходимость учета влажности при оценке механических характеристик. Но если при оценке статических характеристик влияние влажности не существенно и не должно повлиять на статическую прочность материала и, следовательно, на прочность конструкции, то в случае переменных нагрузок, действие которых растянуто во времени, коррозионные процессы могут оказаться определяющими [10].

Аналогичная ситуация складывается и с характеристиками механики хрупкого разрушения, определяющими несущую способность конструкции при наличии трещин. Эти характеристики могут определять как статическую прочность конструкции при наличии трещин (K_{1c} – критический коэффициент интенсивности напряжений при плоской деформации; K_c – критический коэффициент интенсивности напряжений), так и усталостную долговечность конструкции, т. е. оценивать количество циклов нагружения от начальной длины трещины до формирования трещины критической длины (d/dN)– $f(\Delta K)$ [4].

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 В.О. Крениг [4] и Г.В. Акимов, который являлся одним из основоположников отечественной науки о коррозии металлов [11]. Вопрос коррозионной усталости затрагивался и в последующих работах [12, 13]. Тем не менее проблема остается нерешенной и в настоящее время.

Если механическая повреждаемость, реализованная за время усталостных испытаний, может характеризовать повреждаемость, получаемую металлом при длительной эксплуатации, то коррозионное поражение – это процесс достаточно протяженный во времени, исчисляемый годами, а ускоренные коррозионные испытания изменяют механизм коррозионного поражения, имеющий место при эксплуатации [14].

Проблема заключается в отсутствии критерия коррозионной повреждаемости, который мог бы, устанавливая эквивалентность коррозионного воздействия, быть использован при механических испытаниях. Критерий потери массы [11], являясь наиболее объективным критерием коррозии, не может быть использован при механических испытаниях. Единственным вариантом ускорения коррозионного поражения является электрохимическое воздействие, широко используемое для оценки коррозионной активности материалов. Электрохимическое воздействие было использо-

вано и для получения коррозионного поражения с последующей оценкой усталостной долговечности. В качестве модельного материала выбран сплав 1163-Т, а модельной среды 3%-ный NaCl. Для оценки усталостной прочности использовали принятый в отечественной практике образец в виде полосы с отверстием с коэффициентом концентрации напряжений $K_t=2,6$ (рис. 1, а). Испытания проводили при растягивающем цикле нагружения с коэффициентом асимметрии $R=0,1$ и частоте нагружения 40 Гц [2].

При незащищенном от коррозионного воздействия отверстии получено снижение усталостной долговечности более чем в 20 раз – с 642000 до 32000 циклов нагружения. Характер разрушения образцов по разработанной методике приведен на рис. 1, б, в.

Данная методика наглядно иллюстрирует опасность коррозионного поражения и подтверждает постулат о необходимости коррозионной защиты деталей агрегатов самолета. Однако данный эксперимент является только качественной оценкой коррозионного воздействия. Необходимо было разработать критерий коррозионного воздействия, который отражал бы реальный физический процесс и имел бы нормативную базу с возможностью точной оценки регистрируемых показателей [15, 16].

В ВИАМ проведены всесторонние исследования данной проблемы [2, 5, 7, 17, 18].

Результаты

В качестве критерия коррозионного поражения предложена величина поверхностной плотности электрического заряда – Λ [$A \cdot c/m$].

Эксперименты по оценке усталостной долговечности образцов при варьировании величиной поверхностной плотности электрического заряда показали правомерность применения предложенного критерия. 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 получены одинаковые значения усталостной долговечности, что позволяет реализовать фактор «сжатия» времени, который является основной проблемой для коррозионных испытаний. При электрохимическом воздействии с плотностью электрического заряда $40 A \cdot c/mm^2$ получено сокращение продолжительности воздействия в 4 раза.

Предложенный критерий не только фиксирует степень повреждения металла, но и дает основание для введения коррозионного повреждения в эквивалентный цикл усталостного нагружения.

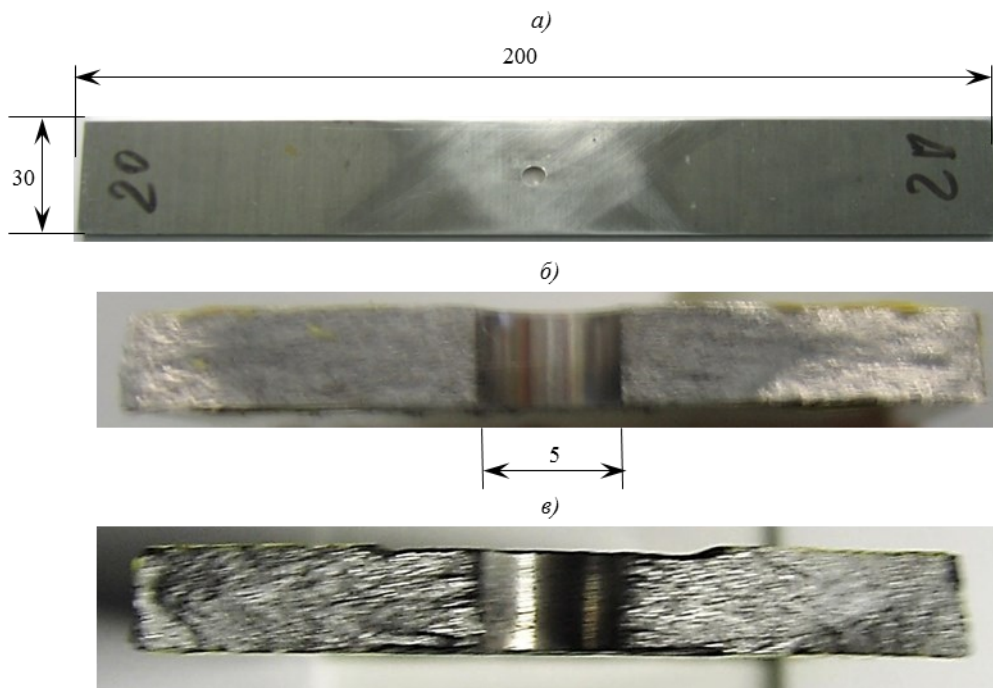


Рис. 1. Стандартный образец для испытаний на малоцикловую усталость (а; $K_f=2,6$) и характер разрушения образца без коррозионного воздействия (б) и после коррозионного воздействия (в)

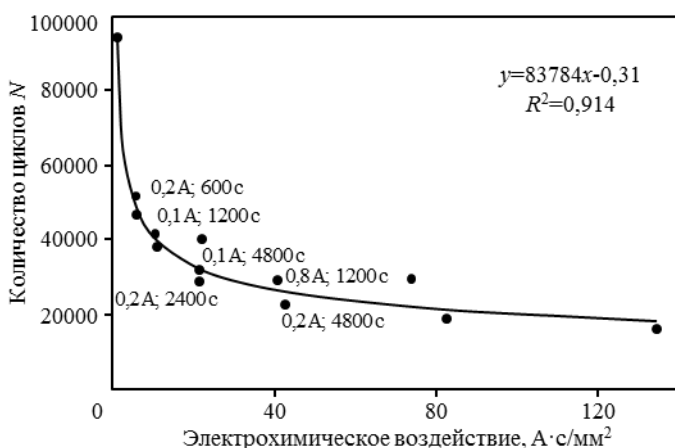


Рис. 2. Изменение усталостной долговечности образцов из листов сплава 1163-АТВ при различном электрохимическом воздействии – силе тока (в амперах) и продолжительности (в секундах)

Обсуждение и заключения

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

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 развиту.

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 след-

ствие, к уменьшению критической длины трещины. Прямой эксперимент с присутствием влаги при определении таких характеристик, как K_c ; $K_c^{уст}$; K_{Ic} , даст ответ на данный вопрос.

Для авиационных материалов наиболее целесообразным представляется определять характеристики усталости и скорость роста трещины усталости (СРТУ) в коррозионной среде, которые могут применяться в качестве расчетных для оценки ресурса авиационных конструкций в условиях воздействия влаги [10].

Предложенный критерий коррозионной повреждаемости – поверхностная плотность электрического заряда, имея физическую основу и хорошую метрологию, тем не менее требует экспериментальных исследований для определения граничных условий его применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. Межгосударственный авиационный комитет. 2009.
2. Гриневич А.В., Жирнов А.Д., Каримова С.А. Прогнозирование усталостной долговечности металлических материалов при коррозионном воздействии // В сб. докладов конф. «Геленджик–2010». М.: ЦАГИ. С. 199–205.
3. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь // Наука и жизнь. 2012. №11. С. 16–21.
4. Крениг В.О. Коррозия металлов. М.-Л.: ОНТИ НКТП. 1936. 204 с.
5. 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.
6. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Долговечность изделий и коррозионная усталость конструкционных материалов // Вопросы материаловедения. 2013. №1. С. 220–229.
7. 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.
8. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. 2007. С. 370–379.
9. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник 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.
10. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Каримова С.А. Прочностные характеристики материалов планера самолетов в условиях влажности // Вопросы материаловедения. 2013. №1. С. 212–219.
11. Акимов Г.В. Теория и методы исследования коррозии металлов. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1945. 414 с.
12. Коррозионная усталость металлов // Под ред. Я.М. Колотыркина. К.: Наукова Думка. 1982. 372 с.
13. Улиг Г.Г., Ревы Р.У. Коррозия и борьба с ней. Л.: Химия. 1989. 456 с.
14. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Исследование остаточной усталостной долговечности алюминиевого сплава В95пчТ1 после экспозиции в различных условиях // Вопросы материаловедения. 2013. №2. С. 118–122.
15. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
16. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 167–182.
17. EUROCORR–2010. The European Corrosion Congress. 2010.
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.