

УДК 66.017:620.1

А.В. Гриневи¹, А.Б. Липтев¹, С.Ю. Скрипачев¹, Г.А. Нужный¹**МАТРИЦА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74

Рассматривается вопрос систематизации расчетных характеристик, исходя из условий действующих нагрузок. Пределные состояния рассматриваются как для сплошного твердого тела, так и для тела с трещиной, предельное состояние которого определяется характеристиками механики разрушения. Наряду с характеристиками, определяемыми в лабораторных стандартных условиях, необходима оценка внешних эксплуатационных факторов, влияющих на прочностные характеристики материалов. Для авиационных конструкций определяющими внешними воздействиями являются температура и влажность. Согласно последним редакциям Норм летной годности, данные факторы должны учитываться при назначении расчетных значений прочностных характеристик конструкционных материалов. Необходимость оценки влияния температуры и влажности на прочностные расчетные характеристики материалов требует системного анализа расчетных характеристик прочности с последующей разработкой методик их определения. В работе затрагивается вопрос статистической оценки расчетных значений прочностных характеристик материала для обоснования долговечности и надежности воздушного судна.

Ключевые слова: прочностные характеристики, температура, влажность, предельное состояние, коррозионное воздействие, статическая прочность, усталость, длительная прочность.

А.В. Grinevich¹, А.Б. Liptev¹, S.Yu. Skripachev¹, G.A. Nuzhnyj¹**MATRIX STRENGTH CHARACTERISTICS
FOR THE ASSESSMENT OF LIMIT STATES OF
STRUCTURAL METALLIC MATERIALS**

The article considers the systematization of design characteristics, based on the conditions of the existing loads. Limit states are considered for both a solid body and a body with a crack, the limiting state of which is determined by the characteristics of fracture mechanics. Along with the characteristics determined in laboratory standard conditions, it is necessary to estimate the external operating conditions affecting the strength characteristics of the materials. For aviation structures, the determining external factors are temperature and humidity. According to the latest editions of the Norms of airworthiness, these factors should be taken into account when assigning calculated values of strength characteristics of structural materials. The necessity to evaluate the influence of temperature and humidity on the strength characteristics of materials requires a systematic analysis of the calculated strength characteristics and the subsequent development of methods for their determination. The article raises the question of the statistical estimation of the calculated values of the strength characteristics of the material to substantiate the longevity and reliability of the aircraft.

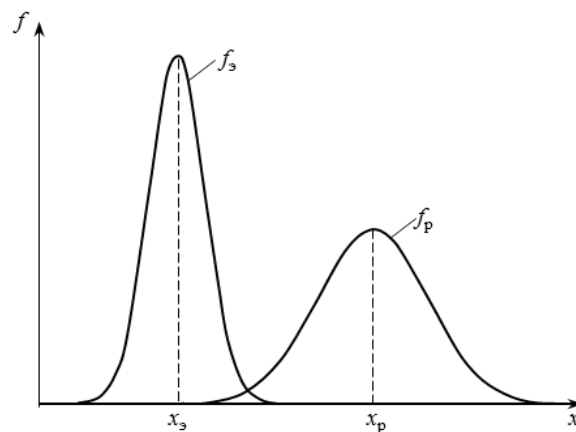
Keywords: strength characteristics, temperature, humidity, limiting condition, corrosive effect, static strength, fatigue, long-term strength.

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

Обоснование прочности воздушного судна в настоящее время опирается на вероятностно-статистический метод, который позволяет определить величины запасов прочности для заданного уровня надежности. Статистические данные по внешним нагрузкам, действующим на детали воз-

душного судна, и несущей способности конструкции позволяют оценить вероятность разрушения воздушного судна. В основополагающей работе по нормированию расчетных условий прочности самолета в качестве коэффициента безопасности предлагается отношение среднего значения разрушающих усилий конструкции к медиане



Плотность распределения вероятности действующей внешней нагрузки ($f_з$) и несущей способности конструкции ($f_п$) [1]

распределения эксплуатационных нагрузок [1]. На рисунке в общем виде приведены кривые плотности распределения вероятностей максимальных внешних нагрузок и несущей способности конструкции. Очевидно, что увеличение разнесения средних, медианных или других точек кривых плотностей распределения приведет к увеличению коэффициента безопасности. Поскольку влияние на величину максимальных внешних нагрузок и плотность их распределения крайне ограничено, то повышение коэффициента безопасности в основном определяется плотностью распределения вероятностей несущей способности конструкции с максимальным ее удалением от кривой внешних нагрузок. Для обеспечения высокой надежности воздушного судна, характеризуемой суммарной вероятностью возникновения аварийной ситуации, которая для самолета в целом не должна превышать 10^{-6} на час полета, необходимо, чтобы левая часть кривой плотности распределения вероятности несущей способности конструкции имела минимальную зону пересечения с правой ветвью кривой, определяющей внешние нагрузки.

Оценка несущей способности воздушного судна, равно как и его ресурса и живучести, базируется на механических характеристиках материалов, используемых в силовой конструкции летательного аппарата [3]. Для реализации вероятностно-статистического метода оценки прочности воздушного судна необходимо статистическое обоснование расчетных значений прочностных характеристик материалов, применяемых в его конструкции.

Попытки введения в Нормы летной годности требований по статистическому представлению прочностных характеристик материалов предпринимались с середины 1970-х годов. Во «Временных нормах летной годности сверхзвуковых гражданских самолетов СССР» от 1975 г. в параграфе 5.13.1.1 указывалось на целесообразность использования статистического анализа для

назначения расчетных значений характеристик, определяющих прочность летательного аппарата. Одновременно отмечалась необходимость учета не только вероятности неразрушения, но и доверительной вероятности, при которой данная статистическая обработка выполнена.

Однако в следующей редакции «Единых норм летной годности гражданских транспортных самолетов стран – членов СЭВ» от 1985 г. вопросы статистического обоснования расчетных характеристик материалов были исключены, что впоследствии негативно сказалось при гармонизации отечественных и зарубежных Норм летной годности.

При гармонизации с американскими Нормами (FAR-25) отечественных Норм летной годности [2], которые озаглавлены «Авиационные Правила», в Части 25 (АП-25) появился параграф 25.613, предписывающий определение расчетных значений прочности на основе статистики. Если ранее это требование формулировалось как пожелание, то в данном параграфе были четко обозначены уровни вероятности неразрушения и доверительные интервалы, с каким они определяются. Для деталей с разным уровнем ответственности за обеспечение несущей способности летательного аппарата устанавливались разные уровни вероятности их неразрушения. Если разрушение детали приводит к потере несущей способности, то уровень надежности устанавливается как возможность не более 5 выпадов за пределы доверительного интервала на 10000 испытанных образцов (базис-А). Для деталей, разрушение которых не столь катастрофично и силовой поток распределяется по другим элементам конструкции, допускается соответственно не более 50 выпадов на 10000 испытанных образцов (базис-В).

В Нормах, сформулировавших требования к статистическому обоснованию расчетных значений прочностных характеристик, ничего не говорится о самих расчетных характеристиках. Параграф 25.603 предписывает необходимость

соответствия используемых материалов в конструкции летательного аппарата техническим условиям. Технические условия на материал включают крайне ограниченное число прочностных характеристик: статическую прочность при растяжении гладких образцов, а для жаропрочных сплавов – длительную прочность при высоких температурах на малых базах испытания. Опыт эксплуатации высокопрочных материалов показал, что хрупкие разрушения конструкции возможны даже при удовлетворении всех требований технических условий, что привело к включению в технические условия в ряде случаев такой характеристики, как вязкость разрушения, определяющей сопротивление материала разрушению при наличии трещины.

Очевидно, что для оценки несущей способности самолета, его долговечности, ресурса и живучести необходимо определение существенно большего числа прочностных характеристик материала. Вопрос нахождения расчетных значений прочностных характеристик конструкционных материалов рассматривается в Рекомендательном циркуляре «Применение конструкционных металлических материалов и определение их расчетных характеристик», в котором приведен весь набор расчетных характеристик, включая и учет воздействия внешней среды [4].

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5].

Методы исследования

Рекомендательный циркуляр № РЦ–АП25-613, подготовленный и введенный Авиационным регистром, устанавливает методы определения соответствия требованиям, представленным в пункте 613 АП-25.

Идеология документа заложена в исходных определениях, которые раскрывают его содержание. Неточность определения затрудняет однозначную трактовку документа и его направленность.

Ошибка определения заключается в переносе смысла с понятия «расчетных характеристик» на понятие «их уровней», т. е. значения свойств. Произошла подмена понятия «расчетные характеристики» на понятие «расчетные значения характеристик». Следуя определению, необходимо определять расчетные характеристики для каждого «парка однотипных конструкций» и, по видимому, условий их эксплуатации, что ставит под вопрос формирование некоторого единого документа по расчетным прочностным значениям материалов. Определение в документе № РЦ–АП25-613 более правомерно для термина «расчетные характеристики материала в кон-

струкции», когда конструктор, исходя из условий работы конструкции, назначает свои расчетные характеристики с соответствующими коэффициентами безопасности и надежности, которые могут быть одинаковыми для однотипных конструкций. При этом конструктор опирается на исходные характеристики материала, полученные при использовании стандартных методов испытаний, которые и рассматриваются как расчетные характеристики материалов [6].

Очевидно, что термин «расчетные характеристики материалов» предопределяет изыскания в получении исходных характеристик материала, которые можно использовать для всех типов конструкций в различных отраслях промышленности. Именно данная идеология заложена в американских справочниках MIL HDBK и MMPDS. Этой же логике следует документ № РЦ–АП25-613 при получении исходных характеристик материалов, достоверность расчетных значений которых статистически обосновывается установлением заданного количества плавок и испытываемых образцов. По сути, документ № РЦ–АП25-613 предусматривает статистическое обоснование прочностных характеристик материалов, которые необходимы для оценки несущей способности, ресурса, календарного срока эксплуатации и безопасной повреждаемости конструкций воздушных судов.

Разработчики рекомендательного циркуляра № РЦ–АП25-613, осознав бесперспективность вышеприведенного принятого определения, предложили новое понятие «справочные (базисные) характеристики», под которое подводятся прочностные характеристики материалов. Данное определение затушевывает понятие «расчетные характеристики», приравнивая его фактически к «справочным характеристикам», поскольку понятия «уровни свойств» и «расчетные значения» эквивалентны.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно разделить понятия «расчетные прочностные характеристики материалов» и «расчетные значения прочностных характеристик материалов» и не определять одно через другое.

Предлагается следующая формулировка: «Расчетные характеристики материалов – характеристики материалов, принимаемые для оценки гарантированной прочности и долговечности конструкций и определяемые по стандартизованным методикам испытания материалов». Данное определение отделяет характеристики, «принимаемые для определения гарантированной прочности и долговечности конструкций», от характеристик, «ранжирующих» материалы по некоторому показателю, но не используемому в прочностных расчетах, как, например, ударная вязкость, твердость.

В рекомендательном циркуляре № РЦ–АП25-613 представлены характеристики, необходимые для оценки прочности и живучести конструкции.

Для определения несущей способности воздушного судна заявлены следующие характеристики материала, определяемые при статических испытаниях:

$\sigma_v(\sigma_v^p)$ – временное сопротивление (предел прочности) при растяжении, МПа;

$\sigma_{0,2}(\sigma_{0,2}^p)$ – условный предел текучести при растяжении, МПа;

$\sigma_{пц}$ – предел пропорциональности при растяжении, МПа;

$\sigma_{0,2сж}$ – условный предел текучести при сжатии, МПа;

$\tau_{ср}$ – сопротивление разрушению при срезе, МПа;

$\sigma_{в,см}$ – сопротивление смятию, МПа;

δ – относительное удлинение при разрушении, %;

E – модуль нормальной упругости при растяжении, МПа;

$E_{сж}$ – модуль нормальной упругости при сжатии, МПа;

G – модуль упругости при сдвиге, МПа;

μ – коэффициент Пуассона.

Диаграмма деформирования при растяжении и сжатии – « σ – ϵ ».

Обоснование ресурса воздушного судна опирается на оценку усталостной долговечности материала, которая представляется в виде кривой усталости. Кривая усталости – аппроксимирующая кривая совокупности точек в координатах « σ – N », где σ – действующее напряжение (как правило, максимальное напряжение цикла); N – количество циклов до разрушения гладких или конструктивно-подобных образцов (полоса с отверстием, цилиндрический образец с кольцевой выточкой, образец-проушина и т. д.). Кривые усталости « N – F » (σ , α_σ , R , f) строятся при варьируемых параметрах α_σ , R и f , где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений; R – коэффициент асимметрии цикла нагружения; f – частота нагружения.

Оценка безопасной повреждаемости воздушного судна опирается на характеристики механики разрушения, с помощью которой стало возможным определение прочности и усталостной долговечности твердого тела с трещиной. В документе № РЦ–АП25-613 представлены следующие характеристики трещиностойкости: K_c , K_{1c} – коэффициенты интенсивности напряжения при плоском напряженном состоянии и при плоской деформации соответственно; скорость роста трещины усталости или кинетическая диаграмма разрушения $dl/dN - f(\Delta K)$; пороговое значение размаха K_{th} , ниже которого трещина не развивается.

В рекомендательном циркуляре № РЦ–АП25-613 расчетные прочностные характеристики материалов при действии температуры и влажности объединены одним разделом, в котором представлены следующие характеристики:

K_{1sc} – предельный уровень коэффициента интенсивности напряжения, при котором в условиях

постоянно действующей нагрузки трещина при воздействии заданной среды не растёт;

$\sigma_{п.р}$ – пороговый уровень напряжений, ниже которого не происходит замедленного коррозионного разрушения;

$\sigma_{кр}^y$ – критическое напряжение, начиная с которого не происходит разрушение образца с концентратором напряжений, нагруженного постоянной нагрузкой, в заданной среде;

$\sigma_{0,2/t}^T$ – предел ползучести при температуре $T^\circ\text{C}$ на временной базе t ;

σ_t^T – предел длительной прочности при температуре $T^\circ\text{C}$ на временной базе t ;

« $\epsilon_{полз-t}$ » – диаграммы ползучести при разных напряжениях σ и температурах $T^\circ\text{C}$;

« $\sigma_t^T - t$ » – диаграммы длительной прочности при температурах $T^\circ\text{C}$ на временной базе t .

В предлагаемый перечень характеристик, наряду с характеристиками, используемыми при расчете гарантированной прочности и долговечности конструкций, включены «ранжирующие» характеристики, которые расставляют материалы в некоторый ряд по отношению к некоторому фактору. К «ранжирующим» характеристикам следует отнести $\sigma_{п.р}$ и $\sigma_{кр}^y$, которые оценивают прочность материала при воздействии коррозионной среды и постоянных напряжений, равно как, например, характеристику «ударная вязкость», которая, оценивая работоспособность стали и даже являясь сдаточным показателем, тем не менее не используется в качестве расчетной характеристики материала [7]. Разработчики рекомендательного циркуляра № РЦ–АП25-613, охватив практически все используемые конструктором прочностные характеристики материала, не ставили задачу анализа расчетных характеристик материалов. Однако данная задача представляется крайне важной в связи с длительными сроками эксплуатации авиационной техники, приближающимися к 25–35 годам, когда начинает сказываться временной фактор.

Результаты анализа и формирование систематики

Рассмотрим проблему расчетных характеристик с позиции предельных состояний материала, оценка которых необходима при определении прочности и надежности конструкции. Предельные состояния материала в конструкции определяются условиями нагружения: статической нагрузкой, длительной постоянной нагрузкой, а также для большинства машин и механизмов – переменной нагрузкой.

Если в механике сплошного тела образование поверхности раздела (трещины) является критерием разрушения, то механика хрупкого разрушения рассматривает разрушение как кинетический процесс образования трещины в сплошном твердом теле, ее развитие до критического размера с последующим спонтанным разрушением твердого

Матрица предельных состояний и расчетные характеристики материалов

Состояние твердого тела	Условия нагружения	Расчетные прочностные характеристики материалов		
		Нормальные условия	Температура	Влажность
Сплошное твердое тело	Статическая нагрузка	$\sigma_b, \sigma_{0,2}, \sigma_{пл}, \mu, E,$ $\delta, \psi, \tau_{ср}, \sigma_{см}, \sigma_{0,2сж},$ $\sigma-F(\varepsilon)$	$\sigma_b^T, \sigma_{0,2}^T, \mu^T, E^T, \delta^T, \psi^T,$ $\tau_{ср}^T, \sigma_{см}^T, \sigma_{0,2сж}^T$	$\sigma_b, \sigma_{0,2}, \sigma_{пл},$ $\mu, E, \delta, \psi,$ $\tau_{ср}, \sigma_{см}, \sigma_{0,2сж}$
			То же после экспозиции при $T^\circ C$	
	Длительная постоянная нагрузка	$\sigma_b, \sigma_{0,2}, \sigma_{пл}, \mu, E,$ $\delta, \psi, \tau_{ср}, \sigma_{см}, \sigma_{0,2сж},$ $\sigma-F(\varepsilon)$	$\sigma_{b/\tau}^T, \sigma_{\varepsilon/\tau}^T$	С покрытием
Переменная нагрузка	Переменная нагрузка	$N=f(\sigma, R_\sigma, K_t)$	$N=f(\sigma, R_\sigma, K_t, T)$	С покрытием
				Без покрытия
Твердое тело с трещиной	Статическая нагрузка	K_c, K_{1c}	K_c^T, K_{1c}^T	K_c, K_{1c}
	Длительная постоянная нагрузка	$[K_c, K_{1c}]-F(\tau)$	$K_c^T(\tau), K_{1c}^T(\tau)$	$K(\tau)$
	Переменная нагрузка	$dI/dN=F(\Delta K)$	$dI/dN=F(\Delta K, T)$	—

тела за счет накопленной упругой энергии. Идеология механики хрупкого разрушения как раздела механики твердого тела рассматривает возможность сохранения несущей способности твердого тела при наличии в нем трещины. Разработка механики хрупкого разрушения решила проблему «хрупкой прочности», введя в практику критерии разрушения и методики их определения [8]. Так, разрушение тела с трещиной происходит при достижении в вершине трещины предельного состояния, определяемого критической величиной коэффициента интенсивности напряжений. Исходя из этой оценки прочности твердого тела, целесообразно рассмотреть предельные состояния как для сплошного твердого тела, так и для тела с трещиной.

Предельное состояние материала в конструкции определяется условиями нагружения: статическое нагружение, когда не учитывается фактор времени, и длительная постоянная или переменные нагрузки.

Принимая во внимание деление твердых тел на сплошное твердое тело и тело с трещиной и три условия нагружения, получим шесть позиций, для которых необходимо установить характеристики, определяющие предельное состояние твердого тела. Это следующие позиции: сплошное тело и тело с трещиной при статической нагрузке; сплошное тело и тело с трещиной при длительной постоянной нагрузке; сплошное тело и тело с трещиной при переменной нагрузке.

Изначально предельные состояния для сплошного тела и тела с трещиной определяются для нормальных лабораторных условий, когда температура испытаний и влажность соответствуют условиям испытаний стандартной лаборатории. На эти шесть позиций предельных состояний, которые можно рассматривать как исходные, могут накладываться факторы внешней среды: тем-

пература, коррозионная среда, радиационные воздействия. Для авиации с учетом требований АП-25 (пункты 603 и 613) определяющими являются температура и влажность. Исходя из рассмотрения всех возможных сочетаний предельных характеристик, сформируем матрицу предельных состояний (см. таблицу). Данную матрицу предельных состояний материала следует заполнить расчетными характеристиками, которые послужат основанием для оценки гарантированной прочности и долговечности материала в конструкции. Предложенная матрица предельных состояний позволяет установить направление изысканий, среди которых наиболее неопределенной областью исследований является влияние коррозионной среды на прочностные характеристики материалов, необходимые для оценки прочности и живучести конструкций.

Заполнение столбца таблицы «Нормальные условия», характеризующего материал при нормальных лабораторных условиях, когда температура составляет 20_{-10}^{+15} , а влажность соответствует лабораторной влажности, не представляет особых затруднений, поскольку расчетные характеристики для них установлены в течение всей истории механических испытаний материалов и конкретизированы в документе № РЦ-АП25-613.

Однако длительное действие постоянной нагрузки при нормальных условиях эксплуатации вызывает вопросы, например, к естественно состаренным материалам, и возникает требование к определению механических характеристик, исходя из возможности «старения» металла. Для конструкционных материалов, используемых в конструкции самолета, данное предположение представляется беспочвенным. Как показали испытания в ЦАГИ* и ВИАМ, для алюминиевых сплавов Д16 и В95 после почти

* Руководитель программы В.В. Коновалов.

35-летней экспозиции самолета на аэродроме, статические и усталостные характеристики этих материалов соответствовали изначально полученным значениям. Таким образом, можно утверждать, что и характеристики вязкости разрушения также не претерпят изменений. Отсюда следует вывод, что для металлических материалов изменения расчетных значений не происходит и возможно использовать расчетные значения материалов, полученные при стандартных квалификационных испытаниях.

Столбец таблицы «Температура» характеризует изменение механических характеристик в условиях действия повышенных и пониженных температур. Низкие температуры оказываются значимыми для стали в связи с ее хрупким разрушением ниже порога хладноломкости, определяемого, как правило, по зависимости ударной вязкости от температуры. Для алюминиевых сплавов низкие температуры не представляют угрозы и определение прочностных характеристик в большинстве случаев нецелесообразно, что указывает на возможность использования при низких температурах для алюминиевых сплавов расчетных значений прочностных характеристик, полученных при нормальных условиях. Однако воздействие высоких температур необходимо учитывать практически для всех металлических материалов. Естественно, что расчетные характеристики при повышенной температуре остаются в основном теми же, что и при нормальной, но определенные при повышенных температурах. Температура влияет на механические характеристики уже при статических испытаниях. Определение статических прочностных характеристик при высоких температурах не представляет принципиальных трудностей. Однако возникает проблема стабильности структуры и фазового состава металлов после длительного воздействия температуры. В большинстве случаев для алюминиевых сплавов необходимо оценить влияние температурных экспозиций на статические характеристики. В американском справочнике MMPDS приводятся кривые снижения прочностных характеристик в зависимости от температуры и времени, причем время температурной экспозиции достигало 10000 ч.

Длительное воздействие температуры на материал приводит к появлению двух новых расчетных прочностных характеристик: предела длительной прочности – $\sigma_{в/т}^T$ и предела текучести – $\sigma_{в/т}^T$. Проблема определения температурных характеристик для тела с трещиной требует детальных исследований, поскольку механика разрушения рассматривает хрупкое состояние материала. Следует отметить, что принципиальные проблемы в определении расчетных характеристик материалов при высоких температурах отсутствуют. При испытаниях в условиях повышенных температур исследователь имеет однородный по всему объему материал. Трудности в данном случае являются чисто методическими, связанными с оснасткой, используемой при испытаниях, и временным интервалом самих

испытаний. Основная проблема испытаний, в которых определяющим фактором является время, – прогнозирование прочностных характеристик на период эксплуатации, исходя из кратковременных лабораторных испытаний, поскольку сдаточные испытания не могут быть продолжительными.

Оценка коррозионных воздействий

Несколько иная ситуация возникает при рассмотрении влияния влажности на расчетные характеристики (см. таблицу). Для металлов наличие влаги приводит к коррозионным поражениям, при которых повреждается поверхность образца или детали при сохранении свойств основного металла [9]. Причем механизм коррозии разнообразен – она может проявляться как общая, питтинговая, межкристаллитная и расслаивающая. Следующий осложняющий фактор – это продолжительность протекания коррозионных процессов, которая может занимать годы [10]. Эти осложняющие обстоятельства привели к тому, что в настоящее время отсутствуют методики оценки расчетных характеристик в условиях воздействия влаги – фактически при воздействии коррозионной среды. При этом выполнено огромное количество исследований по изучению механизма коррозии различных материалов в различных средах. Методически они закреплены в ГОСТ (ГОСТ 9.913 – общая коррозия, ГОСТ 9.021 – межкристаллитная коррозия, ГОСТ 9.904 – питтинговая коррозия, ГОСТ 9.904 – расслаивающая коррозия) и зарубежных стандартах (ASTM B117, ASTM G85, MIL-H-6088, ASTM G46, ASTM G112). Однако и зарубежные, и отечественные стандарты предусматривают оценку коррозионных свойств материала. Единственным стандартом, учитывающим совместное действие механической нагрузки и коррозионной среды, является стандарт на коррозионное растрескивание ASTM E1681 [11] по определению вязкости разрушения в коррозионной среде. Стандарт направлен на определение порогового значения коэффициента интенсивности напряжений, характеризующего начало развития усталостной трещины под действием коррозионной среды. Во ФГУП «ВИАМ» проведены работы по усовершенствованию данного стандарта, а точнее – разработка нового стандарта, позволяющего исследовать кинетику коррозионного растрескивания. Для получения всесторонней информации по воздействию коррозионной среды на твердое тело с трещиной разработан новый тип образца, позволяющий контролировать нагрузку, действующую на него, в любой момент экспозиции [12]. Одновременно решен вопрос по релаксации напряжений в вершине усталостной трещины, что позволило не проводить дополнительные исследования на модельных образцах, как это предусматривалось стандартом ASTM E1681. Исследования, проведенные по новой методике, привели к интересным, даже парадоксальным, результатам [13]. Коррозионное поражение для тела с трещиной может не только снижать вязкость

разрушения, как это имеет место для сплава Д16, но и повышать коэффициент интенсивности напряжений в определенном диапазоне коррозионных воздействий, что было получено для сплава В95. Эффект «затупления» трещины под действием коррозионной среды требует детального исследования. Однако можно констатировать, что проблема коррозионного поражения в условиях длительного воздействия методически решена [14].

Матрица предельных состояний показывает, что остальные области исследования по воздействию коррозионной среды не имеют методической основы, и получение расчетных значений для других условий нагружения и состояния твердого тела требует соответствующих изысканий, несмотря на ряд исследований в данном направлении [15, 16]. В первую очередь необходимо разработать методики испытаний для расчетных характеристик твердого тела при длительном статическом и усталостном нагружении. С учетом требований параграфа 25.603 АП-25 о безусловной защите материала от воздействия агрессивной среды необходимо проводить оценку прочностных характеристик сплошного твердого тела как с антикоррозионными покрытиями, так и без них. Аналогично необходимо разрабатывать методики для оценки воздействия коррозионной среды на сплошное твердое тело при переменных нагрузках [17–20].

Для твердого тела с трещиной в условиях воздействия коррозионной среды остается нерешенным вопрос о расчетных характеристиках при переменных нагрузках. Главенствующей проблематикой при работе с расчетными прочностными характеристиками в условиях воздействия корро-

зионной среды является поиск возможностей нахождения эквивалентных поражений, что обеспечило бы малую временную базу испытаний.

Детализация решения проблемы расчетных характеристик конструкционных металлических материалов при воздействии коррозионной среды, исходя из матрицы предельных состояний, представлена в работе [21].

Обсуждение и заключения

Предложена матрица прочностных характеристик для оценки предельных состояний конструкционных металлических материалов, базирующаяся на условиях испытаний и разделяющая прочностные характеристики сплошного твердого тела и тела с трещиной.

Матрица прочностных характеристик позволила проанализировать состояние существующих и вновь разработанных методик определения расчетных характеристик и наметить направления по их совершенствованию. Изыскания должны быть направлены на разработку методик по определению расчетных значений прочностных характеристик в условиях воздействия коррозионной среды для сплошного твердого тела при длительных постоянных и переменных нагрузках, а для тела с трещиной – при переменных нагрузках.

Разработана методика определения кинетики коррозионного воздействия на тело с трещиной при длительной статической нагрузке в условиях заданной деформации, позволяющая определять нагрузку на образце в любой момент экспозиции и обеспечивающая оценку и компенсацию релаксации напряжений в вершине трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прочность самолета. Методы нормирования расчетных условий прочности самолета / под ред. А.И. Макаревича. М.: Машиностроение, 1975. 280 с.
2. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 35-й Сессии по авиации и использованию воздушного пространства 23.10.2015. 5-е изд. с поправками 1–8. М.: Авиаиздат, 2015. 290 с.
3. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность / под ред. С.В. Серенсена. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
4. Применение конструкционных металлических материалов и определение их расчетных характеристик: рекомендательный циркуляр № РЦ-АП25-613: утв. Решением Президиума Авиарегистра МАК 22.11.2002; М.: Авиаиздат, 2008. 21 с.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Каблов Е.Н., Гриневиц А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
7. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
8. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. Ижевск: ИКИ, 2012. 872 с.
9. Курс М.Г., Кутырев А.Е., Фомина М.А. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при лабораторных и натуральных испытаниях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8 (44). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-10-10.

10. Чесноков Д.В., Антипов В.В., Кулюшина Н.В. Метод ускоренных лабораторных испытаний алюминиевых сплавов с целью прогнозирования их коррозионной стойкости в условиях морской атмосферы // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №5 (41). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-10-10.
11. ASTM E1681-99e1. Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials. 2001. Vol. 03.
12. Устройство для оценки вязкости разрушения конструкционных материалов: пат. 148072 Рос. Федерация; опубл. 27.11.14, Бюл. №3.
13. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Луценко А.Н., Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гулина И.В. Исследование кинетики разрушения конструкционных алюминиевых сплавов при длительном действии постоянной нагрузки и коррозионной среды // Деформация и разрушение материалов. 2016. №10. С. 22–34.
14. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Ерасов В.С., Нужный Г.А. Методика оценки вязкости разрушения в коррозионной среде при длительной статической нагрузке // Заводская лаборатория и диагностика материалов. 2017. №9. С. 52–57.
15. Павловская Т.Г., Дешева Е.А., Зайцев С.Н., Козлов И.А., Волков И.А., Захаров К.Е. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов в условиях, имитирующих факторы космического полета // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №3 (39). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-11-11.
16. 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 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2017).
17. Гриневич А.В., Ерасов В.С., Луценко А.Н., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Скрипачев С.Ю. Проблемные задачи определения расчетных прочностных характеристик авиационных материалов // Сб. IX Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» (посвящена 110-летию со дня рождения профессора, д.т.н. Николая Митрофановича Склярова). М.: ВИАМ, 2017. Ст. 16.
18. Ракова Т.М., Козлова А.А., Нефедов Н.И., Лаптев А.Б. Исследование влияния органических и неорганических ингибиторов коррозии на коррозионное растрескивание высокопрочных сталей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-12-12.
19. Лаптев А.Б., Луценко А.Н., Курс М.Г., Бухарев Г.М. Опыт исследования биокоррозии металлов // Практика противокоррозионной защиты. 2016. №2 (80). С. 36–57.
20. Курс М.Г., Лаптев А.Б., Кутырев А.Е., Морозова Л.В. Исследование коррозионного разрушения деформируемых алюминиевых сплавов при натурно-ускоренных испытаниях. Часть 1. // Вопросы материаловедения. 2016. №1 (85). С. 116–126.
21. Луценко А.Н., Гриневич А.В., Скрипачев С.Ю., Баканов А.В. К вопросу определения расчетных характеристик авиационных металлических материалов с учетом воздействия коррозионной среды // Вопросы материаловедения. 2017. №4 (92). С. 169–182.