

УДК 004.057.2:620.1

М.А. Горбовец¹, Д.А. Кочетков¹, И.А. Ходинев¹**АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ
РОССИЙСКОГО И ЗАРУБЕЖНОГО СТАНДАРТОВ,
УСТАНОВЛИВАЮЩИХ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ
НА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКУЮ УСТАЛОСТЬ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-11-11

Проанализированы стандарты ГОСТ 25.505–85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении» и ASTM E2368-10 «Стандарт по проведению испытаний на термомеханическую усталость при контролируемой деформации» для получения представления о специфике проведения испытаний на термомеханическую усталость и выявления различий между этими стандартами.

Отсутствуют существенные различия между формами цилиндрических образцов и размерами рабочих частей. В российском стандарте указываются необходимые требования по точности изготовления рабочей части образца. Стандарт ASTM E2368-10 содержит более жесткие требования к погрешности нагружения и более подробное описание процедуры испытания, чем ГОСТ 25.505–85. Американский стандарт содержит рекомендации и ссылается на практические руководства по калибровке измерительных систем.

Действующий стандарт ГОСТ 25.505–85 нуждается в существенной доработке в соответствии с современными требованиями.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: термомеханическое нагружение, малоцикловая усталость, испытания, усталость, ТМУ (термомеханическая усталость), деформация.

This paper analyzes the standards GOST 25.505–85 «Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Test method for thermomechanical low-cycle fatigue» and ASTM E2368-10 «Practice for Strain Controlled Thermomechanical fatigue testing» to get an idea about specifics of carrying out tests for thermomechanical fatigue and identify differences between these standards.

There are no significant differences between the samples of cylindrical forms and sizes of the working parts. Russian standard specifies necessary requirements for manufacturing precision of working part of sample. Standard ASTM E2368-10 contains more stringent requirements to the accuracy of loading and a more detailed description of the test procedure than GOST 25.505–85. The US standard provides guidance and refers to the practical guidance on calibration of measuring systems.

The existing state standard GOST 25.505–85 needs substantial improvement in accordance with modern requirements.

Work is performed within realization of the complex scientific 2.2. «Qualifications and research of materials» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: thermomechanical fatigue, low-cycle fatigue (LCF), TMF testing, strain, fatigue, force-controlled, strain-controlled.

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

В современном авиастроении особое внимание обращают на показатели надежности, долговечности и безотказности деталей и узлов, что формирует высокие требования к свойствам материалов. Усовершенствование конструкции двигателя с целью увеличения срока службы, экономичности и КПД при возрастающем уровне рабочей температуры ведет к необходимости повышения у сплавов прочности, сопротивления термической и малоцикловой усталости и стойкости к воздействию окружающей среды, что ставит все новые и новые задачи перед разработчиками материалов [1–4]. Разработка сплавов с повышенными уровнями прочности и сопротивления ползучести достигается при одновременном снижении пластичности до минимально допустимого уровня, выводя проблему сопротивления металлов разрушению при термической малоцикловой усталости на первое место в современной механике разрушения [5, 6].

Не менее важной задачей является определение характеристик и механических свойств сопротивления разработанных материалов термомеханическому деформированию и разрушению – от стадии нагружения до образования трещины. С учетом того, что в процессе эксплуатации летательного аппарата могут изменяться не только нагрузки на узлы, но и другие параметры рабочего режима, например рабочая температура при пуске–остановке ГТД [7–15], необходимо выбирать методику испытания в зависимости от совокупности этих условий или сочетать существующие стандарты для получения необходимых результатов.

Материалы и методы

Проведено сравнение нормативной документации РФ и США, регламентирующей проведение испытаний на термомеханическую усталость. Отечественный стандарт ГОСТ 25.505–85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении» устанавливает методы испытаний на усталость материалов при простых видах деформирования (растяжение–сжатие) при термомеханических нагружениях в условиях повышенных температур до 1100°C на воздухе. Американский стандарт ASTM E2368-10 «Practice for Strain Controlled Thermomechanical Fatigue Testing» («Стандарт по проведению испытаний на термомеханическую усталость при контролируемой деформации») устанавливает методы определения термомеханических усталостных свойств материалов при соосном нагружении в условиях контролируемых деформаций [13].

Результаты

Анализ и последующее сопоставление российского и американского стандартов по содержанию показали, что ГОСТ 25.505–85 и ASTM E2368-10 имеют три общих раздела с похожими названиями, в которых отражены требования, предъявляемые к образцам, оборудованию и проведению испытаний. В стандарте ASTM E2368-10 содержится большее количество разделов, в которых отражается краткое содержание, информация о значимости данных испытаний, ссылки на другие нормативные документы и термины, использованные в руководстве. ГОСТ 25.505–85 также содержит пояснения к терминам, применяемым в стандарте.

Сравнение требований, предъявляемых к образцам

В стандарте РФ в разделе «Форма и размеры образцов» представлены чертежи гладких образцов с рабочей частью круглого сечения четырех типов: трубчатые цилиндрические, сплошные цилиндрические, трубчатые корсетные, сплошные корсетные. Для испытаний в условиях растяжения–сжатия допускается использовать все вышеперечисленные типы образцов, а для испытаний при переменном кручении – трубчатые

цилиндрические образцы. В ГОСТ 25.505–85 приведены размеры рабочей части для каждого типа образца, однако допускается использование геометрически подобных образцов при условии, что диаметр рабочей части образца при испытаниях на растяжение–сжатие должен быть не менее 5 мм, а на кручение – не менее 18 мм.

Образцы изготавливают в соответствии с ГОСТ 25.502–79. Точность исполнения рабочей части образца назначается не ниже 7-го качества по ГОСТ 25347–89, параметр шероховатости $R_a=0,32-0,16$ мкм по ГОСТ 2789–73, а для трубчатых образцов допуск соосности внешней и внутренней цилиндрической поверхности рабочей части по 7-му качеству допуска размера по ГОСТ 24643–81.

В американском стандарте в пункте Specimens (Образцы) даются указания на использование образцов цилиндрической формы трубчатого или сплошного типов. Отмечается предпочтительное использование образцов трубчатого типа для снижения вероятности появления нежелательных радиальных температурных градиентов. Конкретные геометрические размеры и формы трубчатых образцов выбираются в зависимости от материала и параметров испытания. Для данного типа образцов критически важным размером является толщина стенки, которая должна быть одновременно достаточно толстой, чтобы избежать неустойчивости во время циклического нагружения, и тонкой для поддержания постоянной температуры в сечении рабочей части образца. Соотношение внешнего диаметра (D) и толщины стенки (s) образца должно лежать в интервале: $5 < D/s < 15$. В качестве примера приведены чертежи трех типов трубчатых образцов, применяемых для испытаний на термомеханическую усталость, но не являющиеся готовыми или рекомендованными чертежами.

При разработке сплошных образцов, в ASTM E2368-10 есть ссылка на ASTM E606-04 «Standart Practice for Strain – Controlled Fatigue Testing» («Стандартный метод испытаний на усталость при контролируемой деформации»). Рекомендуемый диаметр рабочей части для сплошных образцов 6,35 мм, но допускается использование других диаметров при соблюдении указанных пропорций. Выбирая образцы со сплошным профилем для испытаний, необходимо быть уверенным, что радиальный температурный градиент не является чрезмерным.

В американском стандарте есть ссылка на приложение X3 в ASTM E606-04, где приведен пример заключительной части процедуры по механической обработке рабочей части образца при его изготовлении, однако отсутствуют указания по точности изготовления образцов.

При сравнении образцов, указанных в зарубежном и отечественном стандартах, не было выявлено существенных различий в их геометрической форме. Отличия в размерах рабочих частей образцов не являются существенными. Стоит отметить, что в стандарте РФ (в отличие от американского) даны конкретные указания по поводу точности изготовления рабочей части образца.

Сравнение требований, предъявляемых к оборудованию

В российском стандарте требования к испытательному оборудованию отражены в разделе «Испытательные машины и аппаратура», а в американском – Test apparatus (Испытательная аппаратура) и частично в разделе Test procedure (Процедура испытаний). В обоих стандартах приводятся список необходимого оборудования и критерии, которым должна соответствовать испытательная техника, а также требования к ее точности.

В стандарте РФ допустимые погрешности нагружения и деформации в процессе испытания регламентируются ГОСТ 25.502–79. Стандарт устанавливает допустимую погрешность для деформации $\pm 3\%$ измеряемой величины, а для нагружения – погрешность зависит от частоты (f) нагружения в процентах от измеряемой величины следующим образом:

$\pm 2\%$ – при $f \leq 0,5$ Гц;

$\pm 3\%$ – при $0,5 \leq f \leq 50$ Гц;

$\pm 5\%$ – при $f \geq 50$ Гц.

В ASTM E2368-10 погрешность нагружения не превышает $\pm 2\%$. Ошибка синхронизации циклов нагружения и изменения температуры не должна превышать $\pm 5\%$. Значения температур, регистрируемых контрольным прибором, не должны отличаться более чем на $\pm 1\% \cdot T_{\max}$.

Значения допустимых погрешностей измерения, регистрации и поддержания нагрузок и температур для обоих стандартов приведены в таблице.

Допустимые погрешности

Стандарт	Значения допустимых погрешностей		
	нагрузки	деформации	температуры*, °C
	%		
ГОСТ 25.502–79	$\pm(2-5)$	± 3	$\pm 1\% \cdot T_{\max}$
ASTM E2368-10	± 2	± 2	$\pm 1\% \cdot T_{\max}$

* T_{\max} – максимальное значение температуры в течение всего процесса испытания.

В американском стандарте измерение осевых деформаций в рабочей области образца осуществляется экстензометром, имеющим класс точности В-2 или выше в соответствии со стандартом ASTM E83. Измерение температуры на образце производится при помощи термодпар, контактирующих с поверхностью образца; в паре с устройством для отображения значений температуры или бесконтактным датчиком. Калибровка системы, измеряющей температуру, осуществляется в соответствии с методикой, описанной в стандарте ASTM E220. В российском стандарте не отражены требования к измерительным системам.

В зарубежном стандарте даны руководства, содержащие дополнительные требования для испытательного оборудования и процедуры калибровки измерительных систем. Данные меры будут оказывать положительное влияние на точность результатов испытаний.

Сравнение требований, предъявляемых к проведению испытания

В анализируемых стандартах в разделах, описывающих процедуру проведения испытания, присутствуют общие по содержанию подразделы, регламентирующие критерии окончания испытания, контроль хода испытания. Испытания проводятся до момента появления макротрещины. При «жестком» режиме нагружения допускается оценивать появление макротрещины по падению напряжения. В российском стандарте падение напряжения составляет 50% от значения установившейся нагрузки, а в американском – обычно выбирается в диапазоне от 5÷50% от пиковой величины ранее зарегистрированной нагрузки.

Важным моментом, отмеченным в обоих стандартах, является контроль неравномерности распределения температуры на базе измерения деформации. В стандарте ГОСТ 25.502–79 допускаются следующие перепады температур:

$\pm 1\% \cdot T_{\max}$ – на базе измерения деформации;

$\pm 1^\circ\text{C}/\text{мм}$ – поперечный перепад температуры в зоне измерения деформации и образования разрушения.

В стандарте ASTM E2368-10 указывается, что параметры управляющего температурой цикла (максимальное и минимальное значения температуры, скорость изменения температуры) должны оставаться постоянными в течение всего испытания, за исключением случая, когда целью испытания не является изучение влияния этих параметров на поведение материала. Погрешность регистрации температуры

измерительными устройствами не должна превышать ± 2 К от соответствующих величин в первоначальном температурном цикле.

Максимальный допустимый осевой градиент температур рабочей части образца не должен отличаться более чем на $\pm 1\% \cdot T_{\max}$ или ± 3 К, где T_{\max} – максимальная температура цикла в градусах Кельвина, измеренная при динамических условиях. Максимальный допустимый поперечный градиент температур рабочей части образца не должен отличаться более чем на $\pm 1\% \cdot T_{\max}$ или ± 7 К.

В зарубежном стандарте в отличие от российского указываются методы для компенсации возникающих тепловых деформаций в ходе испытания. Метод выбирается в зависимости от специфики испытательного оборудования, аппаратного и программного управляющего обеспечения. Для измеренной тепловой деформации устанавливают зависимость (одну или две), что может быть необходимо в зависимости от уровня температурного гистерезиса (одна зависимость для фазы нагрева, вторая – для фазы охлаждения). Далее приведено описание для двух широко используемых методов компенсации температурных деформаций.

Компенсация деформации по времени. Деформация, возникающая в результате изменения температуры, может быть компенсирована путем регистрации температурных деформаций свободного расширения (на образец не воздействует сила) в зависимости от времени цикла до начала испытания. Температурный цикл должен быть идентичен для последующего теста на термомеханическую усталость – эти записанные значения могут быть вызваны в соответствующие моменты времени в цикле, чтобы обеспечить коррекцию величины деформации.

Компенсация деформации по температуре. Возникающая температурная деформация может быть компенсирована путем регистрации температурных деформаций свободного расширения (при поддержании нулевой нагрузки на образец) в зависимости от температуры образца до начала испытания. Температурный цикл должен быть идентичен для последующего теста на термомеханическую усталость – эти значения можно использовать для соответствующих функции или функций (как правило, одна часть цикла для нагрева, а другая – для охлаждения), где температура является независимой переменной. Эти функции могут быть использованы для расчета напряжения компенсации для любой измеренной температуры во время испытания на усталость.

В свою очередь, стандарт РФ содержит рекомендации по выбору количества образцов в зависимости от дисперсии результатов, однако не менее 10–12 образцов с зачетными результатами для построения кривой усталости на разных уровнях нагружения, но не менее четырех уровней. В разделе «Обработка результатов» содержатся процедура представления исходных данных и результатов, алгоритм действий для построения кривых усталости по параметрам, способы графического представления получаемых характеристик.

В ASTM E2368-10 в разделах Report (Отчет) и Data Reduction and Analysis (Сокращение массива данных и анализ) отсутствует информация о способах представления и построения кривых усталости. В указанных ранее разделах содержится перечень необходимой информации для указания в отчетности об испытании, а также способы обработки массива данных, полученных в процессе испытания.

Обсуждение и заключения

В результате анализа отечественного и зарубежного стандартов установлено, что:

– отсутствуют существенные различия между формами цилиндрических образцов и размерами рабочих частей;

- российский стандарт содержит конкретные требования с указанной точностью изготовления рабочей части образца;
- в зарубежном стандарте предъявляются более жесткие требования к погрешностям нагружения и деформации;
- в ASTM E2368-10 более подробно прописана процедура проведения испытания;
- оба стандарта содержат близкие требования по допускаемым продольным/поперечным неравномерностям распределения температур;
- стандарт ГОСТ 25.505–85, введенный в действие в 1986 г., является более информативным для получения статистических характеристик и свойств сопротивления термомеханической усталости, однако требует пересмотра величин погрешностей для испытательных машин и измерительных приборов, добавления общих руководств по калибровке нагревательных и измерительных систем для повышения точности получения результатов испытаний, добавления более подробного описания процедуры испытания с учетом современных требований, предъявляемых в отраслях промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. 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.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // Metallurg. 2013. №12. С. 4–8.
5. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.
6. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели: информ. бюл. 2014. №31. С. 43–47.
7. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Горбовец М.А., Бакрадзе М.М., Гольдберг М.А. Малоцикловая усталость при заданной деформации и параметры упругопластического деформирования жаропрочного сплава ВЖ175 // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 87–92. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-87-92.
8. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН–ЦИАМ, 2013. 515 с.
9. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
10. Schijve J. Fatigue of structures and materials. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 185 с.
11. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
12. Beck T., Rau K. Temperature measurement and control methods in TMF testing – a comparison and evaluation// International journal of fatigue. 2008. Vol. 30 (2). P. 226–233.
13. Лебедев А.А., Ковальчук Б.И., Гигиняк Ф.Ф., Ламашевский В.П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: справочник. 3-е изд., перераб. и доп. Киев: Ин Юре, 2003. 539 с.
14. Nagesha A., Goyal Sunil, Nandagopal M. et al. Dynamic strain ageing in Inconel Alloy 783 under tension and low cycle fatigue // Material Science and Engineering A. 2012. Vol. 546. P. 34–39.
15. Иноземцев А.А., Ратчиев А.М., Нихамкин М.Ш. и др. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин // Тяжелое машиностроение. 2011. №4. С. 30–33.