



УДК 620.178.35

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РОССИЙСКОГО  
И ЗАРУБЕЖНЫХ СТАНДАРТОВ ИСПЫТАНИЙ  
НА УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ**

М.С. Беляев

*кандидат технических наук*

К.К. Хвацкий

М.А. Горбовец

**Сентябрь 2014**

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.

*М.С. Беляев<sup>1</sup>, К.К. Хвацкий<sup>1</sup>, М.А. Горбовец<sup>1</sup>*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РОССИЙСКОГО И ЗАРУБЕЖНЫХ СТАНДАРТОВ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ**

*Проведен сравнительный анализ стандартов РФ и США, регламентирующих проведение испытаний на многоцикловую (МнЦУ) и малоцикловую усталость (МЦУ). Рассмотрены стандарт РФ ГОСТ 25.502–79 с изменениями 1985 г. «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» и стандарты США ASTM E466–07 «Стандарт по проведению испытаний на усталость металлических материалов при осевом приложении силы с постоянной амплитудой», ASTM E606–04 «Стандарт по испытаниям на усталость при контролируемой деформации».*

*Показано, что существенных различий между размерами рабочей части образцов, установленными в отечественном и зарубежных стандартах, не имеется. В стандартах ASTM E к состоянию поверхности рабочей части образца предъявляются значительно более высокие требования, чем в отечественном стандарте. Стандарты ASTM E содержат более жесткие требования к погрешности нагружения, чем ГОСТ 25.502–79. Действующий стандарт ГОСТ 25.502–79 с изменениями 1985 г. нуждается в существенной переработке.*

**Ключевые слова:** *испытания на усталость, стандарты РФ и США, образцы для испытаний, поверхность образца, погрешность, параметры испытаний, требования стандарта.*

*M.S. Belyaev, K.K. Khvatskiy, M.A. Gorbovets*

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF NATIONAL STANDARDS OF RF AND THE USA ON METHODS OF METALS FATIGUE TESTING**

*A comparative analysis of national standards of RF and the USA on test methods of low-cycle fatigue (LCF) and high-cycle fatigue (HCF) was carried out in this work. The following national standards were considered: RF standard GOST 25.502–79, last revision in 1985, «Strength analysis and testing in machine building. Methods of mechanical testing of metals. Methods of fatigue testing» and two national standards of the USA*

– ASTM E466–07 «Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials» and ASTM E606–04 «Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing».

*It was shown that there is no noticeable difference between gage sizes of specimens in the standards mentioned above. As compared with GOST, ASTM E standards specify additional high requirements to specimen surfaces and to loading errors. Thus, National standard of RF GOST 25.502–79, last revision in 1985, has to be essentially modified.*

**Keywords:** *fatigue testing, RF and USA standards, specimens for testing, specimen surface, error, test parameters, standard requirements.*

---

<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 center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

## **Введение**

Значительная часть конструкций в процессе эксплуатации подвергается воздействию переменных напряжений или деформаций. Такой характер воздействия принято называть усталостным нагружением. Для того чтобы обеспечить надежную, безотказную эксплуатацию конструкций, необходимо знать характеристики сопротивления усталостному нагружению конструкционных материалов [1–3]. Номенклатуру и правила определения характеристик усталости устанавливают стандарты. В разных отраслях промышленности, странах и государственных объединениях действуют стандарты, которые в определенной степени различаются между собой. Для многих материалов, применяемых в авиационной промышленности, определение характеристик усталости является обязательным [4–8]. Развитие научно-технических дисциплин, связанных с созданием, производством и испытаниями авиационных материалов, находит отражение в постепенном изменении стандартов [9–17]. В настоящее время актуальной проблемой является сравнение стандартов, действующих в области испытаний на усталость в Российской Федерации и США.

## **Материалы и методы**

Проведено сравнение нормативной документации РФ и США, регламентирующей проведение испытаний на многоцикловую (МнЦУ) и малоцикловую усталость (МЦУ). Российский стандарт ГОСТ 25.502–79 с изменениями 1985 г. «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы ис-

пытаний на усталость» объединяет испытания металлических материалов на МнЦУ и МЦУ. Американские стандарты серии ASTM E включают два нормативных документа, описывающих процедуру испытаний на усталость. ASTM E466–07 «Стандарт по проведению испытаний на усталость металлических материалов при осевом приложении силы с постоянной амплитудой» описывает проведение испытаний на МнЦУ, а ASTM E606–04 «Стандарт по испытаниям на усталость при контролируемой деформации» – на МЦУ.

### Результаты

Сравнительный анализ нормативной документации РФ и США по содержанию и структуре стандартов показал, что стандарты ASTM E имеют общую структурную основу, но при этом стандарты ASTM E466–07 и ASTM E606–04 существенно отличаются по составу разделов, а стандарт ГОСТ 25.502–79 по содержанию близок к стандартам ASTM E, но имеет отличия и меньше по объему.

Все три стандарта содержат разделы «Образцы», «Характеристики оборудования», «Проведение испытаний». Отметим, что в стандарте ASTM E606–04 раздел «Характеристики оборудования» включен в более общий раздел «Методология».

Каждый стандарт ASTM E содержит чертежи четырех образцов для испытаний, в том числе два образца кругового сечения и два плоских. Все образцы гладкие. Стандарт РФ содержит 10 чертежей образцов, в том числе 6 образцов с надрезом. Имеется указание, что для испытаний на МЦУ следует применять гладкие образцы.

Представляет интерес сравнение параметров рабочей части образцов, рекомендуемых различными стандартами (табл. 1).

Таблица 1

#### Рекомендуемые размеры рабочей части гладких цилиндрических образцов с участком постоянного сечения для испытаний на МнЦУ и МЦУ

Стандарт	Диаметр рабочей части $d$ , мм	Длина рабочей части $l_0$ , мм
ГОСТ 25.502–79	5–25	$5d$
ASTM E466	5–25	$2d \div 3d$
ASTM E606	6,35*	$3d \pm d$

\* Возможны другие размеры, ограничения не указаны.

Видно, что образцы имеют равные или достаточно близкие значения диаметра рабочей части. Длина рабочей части несколько больше у отечественного образца. В целом можно сказать, что существенных различий между размерами рабочей части образцов, установленными в отечественном и зарубежных стандартах, не имеется.

Между отечественным и зарубежными стандартами наблюдается два существенных различия. Первое состоит в том, что зарубежные стандарты не содержат образцов с

надрезом. В стандарте ASTM E466–07 сказано: «Принимая во внимание специализированный характер программ испытаний, включающих образцы с надрезом, на конструкцию последних ограничения не накладываются. Должна быть приведена информация о параметрах надреза, величине теоретического коэффициента концентрации напряжений  $K_t$  и источник ее определения».

Второе различие состоит в том, что отечественный стандарт устанавливает фиксированные размеры рабочей части гладкого образца и геометрические параметры надреза. В то же время стандарты ASTM E, приводя размеры рабочей части, указывают, что эти размеры носят рекомендательный характер, и возможно испытание образцов другого диаметра, вписывающегося в установленные пределы.

Следует подчеркнуть, что в стандартах ASTM E к состоянию поверхности рабочей части гладкого цилиндрического образца предъявляются значительно более высокие требования, чем в отечественном стандарте. Указывается на необходимость минимизации остаточных напряжений и проведения в качестве завершающей операции полировки поверхности в направлении вдоль оси образца. Имеются также другие рекомендации. В приложении к каждому стандарту приведен пример технологии финальной механической обработки поверхности рабочей части образца.

Следует признать, что в отечественном стандарте к состоянию поверхности рабочей части образца предъявляются значительно более мягкие требования.

Отметим, что область применения стандарта ASTM E606–04 шире, чем только металлические материалы. Стандарт распространяется на «номинально однородные материалы», т. е. на определенные неметаллы, например на органическое стекло.

Все рассмотренные стандарты содержат раздел «Характеристики оборудования», хотя он может носить иное название, например, в ГОСТ 25.502–79 – «Аппаратура». В стандартах ГОСТ 25.502–79 и ASTM E466–07 это небольшой по объему раздел, в котором сообщается каким условиям испытаний должна отвечать испытательная машина и приводятся требования к точности испытательной техники. В стандарте ASTM E606–04 этот раздел написан более подробно и включает такие составные части, как испытательная машина, контроль деформации, экстензометры и другие.

Стандарт ГОСТ 25.502–79 устанавливает более высокие значения погрешности нагружения в процессе испытания. Основным влияющим фактором в этом случае является частота нагружения. При частоте нагружения  $\leq 0,5$  Гц погрешность нагружения составляет  $\pm 2\%$ , при более высоких частотах:  $\pm(3\div 5)\%$ . В то же время в стандартах ASTM E погрешность не превышает  $\pm 2\%$ . При испытаниях на МЦУ («жесткий» цикл

нагружения) деформации при изгибе образца, как установлено в обоих стандартах, не должны превышать 5%. В систематизированном виде значения погрешностей приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Точность параметров испытания**

Стандарт	Пределы отклонения параметров испытания			
	по нагрузке	по деформации	по температуре	
	%		°С	в интервале температур, °С
ГОСТ 25.502–79	±(2–5)	±3	±6 ±8 ±12	<600 600–800 900–1200
ASTM E606	±1	±1	±1% ±1	200- $T_{\max}$ $T_{\text{исп}}$ -200
ASTM E466	±2	–	–	–

Отметим существенное отличие между стандартами ASTM E и ГОСТ, связанное с применяемой испытательной машиной. В зарубежных стандартах присутствуют подразделы «Закрепление образца» и «Контроль соосности», которые отсутствуют в ГОСТ. Присутствие в стандартах указанных операций оказывает значительное влияние на точность результатов испытаний, и их следует включить в новую редакцию отечественного стандарта.

Раздел «Проведение испытаний» присутствует во всех анализируемых стандартах, однако его содержание различно. Максимальный объем этот раздел занимает в стандарте ASTM E606–04 и включает такие подразделы, как: температура, контроль испытательной машины, скорость деформации и частота нагружения, критерии разрушения, анализ данных и другие. Стандарт подробно регламентирует параметры проведения испытаний и, в определенной мере, анализ результатов. По степени регламентации проведения испытаний он значительно превосходит стандарт ASTM E466–07, который в этом разделе содержит всего два подраздела «Закрепление образца» и «Проверка (обеспечение) соосности».

В ГОСТ 25.502–79 раздел «Проведение испытаний» имеет иную структуру, чем стандарты ASTM E. Он содержит общие рекомендации по проведению испытаний на усталость, которые в стандартах ASTM E входят в другие разделы – например, указания по количеству испытываемых образцов, частоте и температуре испытаний. Отметим, что допускаемые отклонения температуры на рабочей части образца в стандартах ГОСТ 25.502–79 и ASTM E606–04 достаточно близки и составляют ±1% от заданной температуры (см. табл. 2).

Раздел «Проведение испытаний» в ГОСТ 25.502–79 включает подразделы «Испытания на многоцикловую усталость» и «Испытания на малоцикловую усталость», кото-

рые в ASTM E имеют статус отдельных стандартов. В подразделе «Испытания на многоцикловую усталость» записано, что для построения кривой усталости и определения предела выносливости испытывают не менее 15 одинаковых образцов. В интервале напряжений вблизи значения предела выносливости должны быть испытаны не менее трех образцов, при этом не менее половины из них не должны разрушаться до базы испытаний.

В рассматриваемых стандартах помимо общих разделов имеются разделы, которые в других стандартах отсутствуют. Стандарты ASTM E имеют раздел «Значение и применение», в котором содержание испытания рассмотрено на основе физико-механического подхода, описана сфера применения результатов испытания, в частности – как критерия качества материала. Стандарт ASTM E606–04 содержит раздел «Аналитические зависимости» и приложение, предназначенные для описания результатов испытаний на МЦУ. При этом стандарты ASTM E не содержат раздела «Обработка результатов». Требования к обработке результатов испытаний сформулированы в стандартах ASTM E468–11 и ASTM E739–10.

Отечественный стандарт ГОСТ 25.502–79 включает раздел «Обработка результатов», а также три приложения по этой части. В этом разделе указано – какие характеристики сопротивления усталости можно определить по результатам испытаний. Стандарт устанавливает, что кривые усталости по результатам испытаний строят методом графического интерполирования экспериментальных результатов или по способу наименьших квадратов. Раздел включает подразделы «Обработка результатов испытаний на многоцикловую усталость» и «Обработка результатов испытаний на малоцикловую усталость». Последний подраздел не содержит рекомендуемых аналитических зависимостей в отличие от стандарта ASTM E606–04.

Российский стандарт имеет еще одно существенное отличие от стандартов ASTM E. Стандарт ГОСТ 25.502–79 предусматривает возможность проведения испытаний на усталость при различных типах нагружения: растяжении, растяжении–сжатии, изгибе и кручении. Рассмотренные стандарты ASTM E описывают испытания только в условиях осевого нагружения, т. е. при растяжении и растяжении–сжатии. Имея в виду это обстоятельство, а также наличие раздела «Обработка результатов», можно отметить, что отечественный стандарт в определенном смысле шире зарубежных.

### **Обсуждение и заключения**

– существенных различий между размерами рабочей части гладких цилиндрических образцов, установленными в российском и зарубежных стандартах, не имеется;

- в стандартах ASTM E к состоянию поверхности рабочей части образца предъявляются значительно более высокие требования, чем в отечественном стандарте;
- раздел «Проведение испытаний» в стандартах ASTM E и ГОСТ 25.502–79 имеет различную структуру, наиболее подробно он описан в стандарте ASTM E606–04. Требования по допускаемым отклонениям температуры на рабочей части образца в стандартах ГОСТ 25.502–79 и ASTM E606–04 достаточно близки и составляют  $\pm 1\%$  от заданной температуры;
- раздел «Характеристики оборудования» (в отечественном стандарте – «Аппаратура») в стандартах ASTM E содержит более жесткие требования к погрешности нагружения, чем в ГОСТ 25.502–79;
- стандарт ГОСТ 25.502–79 включает раздел «Обработка результатов», тогда как стандарты ASTM E такого раздела не содержат; процедуры обработки результатов описаны в других стандартах;
- действующий стандарт ГОСТ 25.502–79 с изменениями 1985 г. нуждается в существенной переработке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов: Справочник. М.: ОАО «ОАК». 2011. 304 с.
2. Луценко А.Н. Испытательный центр ФГУП «ВИАМ»: Основные направления исследований и испытаний, перспективы развития /В сб. материалов конф. «Тест-Мат–2013». М.: ВИАМ. 2013 (CD-диск).
3. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН – ЦИАМ. 2013. 515 с.
4. 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.
5. 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.
6. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34.
7. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.

8. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.
9. Крылов В.Д. Методы испытаний и особенности разрушения тонколистовых материалов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 54–57.
10. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
11. Беляев М.С., Горбовец М.А., Комарова Т.И. Способ испытаний и расчетное определение предела выносливости для горизонтального участка кривой усталости //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 50–55.
12. Schijve J. Fatigue of structures and materials. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. 185 с.
13. Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Современные методы исследования высокотемпературной прочности металлических материалов /В сб. материалов конф. «ТестМат–2013». М.: ВИАМ. 2013 (CD-диск).
14. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
15. Wright J.K., Carroll L.J., Simpson J.A. et al. Low Cycle Fatigue of Alloy 617 at 850°C and 950°C //J. of Eng. Mat. and Tech. 2013. V. 135. №7. P. 031005-1–031005-8.
16. Levkovitch V., Sievert R., Svendsen B. Simulation of deformation and lifetime behavior of a FCC single cristal superalloy at high temperature under low-cycle fatigue loading //Int. J. Fatigue. 2006. V. 28 (12). P. 1791–1802.
17. Степнов М.Н., Наумкин А.С. Чувствительность конструкционных материалов к концентрации напряжений в области многоциклового усталости //Вестник машиностроения. 2011. №4. С. 22–25.

#### REFERENCES LIST

1. Raschetnye znachenija harakteristik aviacionnyh metallicheskih konstrukcionnyh materialov [The calculated values of the characteristics of aircraft metallic structural materials]: Spravochnik. М.: ОАО «ОАК». 2011. 304 s.
2. Lucenko A.N. Ispytatel'nyj centr FGUP «VIAM»: Osnovnye napravlenija issledovanij i ispytanij, perspektivy razvitija [Testing center of FSUE «VIAM»: Trends of research and testing, development prospects] /V sb. materialov konf. «TestMat–2013». М.: ВИАМ. 2013 (CD-disk).

3. Terent'ev V.F., Petuhov A.N. Uсталost' vysokoprochnyh metallicheskih materialov [Tired of high-metallic materials]. M.: IMET RAN – CIAM. 2013. 515 s.
4. 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] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
5. Erasov V.S., Grinevich A.V., Senik V.Ja., Konovalov V.V., Trunin Ju.P., Nesterenko G.I. Raschetnye znachenija harakteristik prochnosti aviacionnyh materialov [The calculated values of the strength characteristics of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 14–16.
6. Kablov E.N., Lomborg B.S., Ospennikova O.G. Sozdanie sovremennyh zharoprochnyh materialov i tehnologij ih proizvodstva dlja aviacionnogo dvigatelestroenija [The creation of modern high-temperature materials and manufacturing technologies for aircraft engine] //Kryl'ja Rodiny. 2012. №3–4. S. 34.
7. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
8. Erasov V.S., Jakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Kvalifikacionnye ispytanija i issledovanija prochnosti aviacionnyh materialov [Qualification testing and research strength of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 440–448.
9. Krylov V.D. Metody ispytanij i osobennosti razrushenija tonkolistovyh materialov [Test methods and especially the destruction of thin materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №4. S. 54–57.
10. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace Materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
11. Beljaev M.S., Gorbovec M.A., Komarova T.I. Sposob ispytanij i raschetnoe opredelenie predela vynoslivosti dlja gorizontalnogo uchastka krivoj ustalosti [Test Method and settlement definition of the fatigue limit for the horizontal part of the fatigue curve] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №3. S. 50–55.
12. Schijve J. Fatigue of structures and materials. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 2009. 185 c.
13. Hvackij K.K., Gorbovec M.A. Sovremennye metody issledovanija vysokotemperaturnoj prochnosti metallicheskih materialov [Modern methods of research of high-

strength metallic materials] /V sb. materialov konf. «TestMat–2013». M.: VIAM. 2013 (CD-disk).

14. Erasov V.S., Nuzhnyj G.A. Zhestkij cikl nagruženija pri ustalostnyh ispytaniyah [Hard loading cycle fatigue tests at] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 35–40.
15. Wright J.K., Carroll L.J., Simpson J.A. et al. Low Cycle Fatigue of Alloy 617 at 850°C and 950°C //J. of Eng. Mat. and Tech. 2013. V. 135. №7. P. 031005-1–031005-8.
16. Levkovitch V., Sievert R., Svendsen B. Simulation of deformation and lifetime behavior of a FCC single cristal superalloy at high temperature under low-cycle fatigue loading //Int. J. Fatigue. 2006. V. 28 (12). P. 1791–1802.
17. Stepnov M.N., Naumkin A.S. Chuvstvitel'nost' konstrukcionnyh materialov k koncentracii naprjazhenij v oblasti mnogociklovoj ustalosti [Sensitivity of structural materials to stress concentration in the high-cycle fatigue] //Vestnik mashinostroenija. 2011. №4. S. 22–25.