

УДК 620.178.35

В.С. Ерасов¹, Е.И. Орешко¹

**ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)
Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний
и обработки результатов***

Проведен обзор по методикам проведения испытаний и представлены результаты испытаний металлических материалов на усталость. Представлен анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Построены деформационные кривые усталости для нескольких марок металлических материалов. Предложена методика программного жесткого нагружения ($R_\epsilon = -1$) с пошаговым увеличением деформации образца и построением поверхности в 3D-пространстве с координатами «lgN– σ – ϵ » и обобщенной диаграммы циклического деформирования.

Ключевые слова: усталостные испытания, выносливость, усталостная трещина, деформация, уравнение Басквина–Мэнсона–Коффина, программное жесткое нагружение, диаграмма циклического деформирования.

V.S. Erasov¹, E.I. Oreshko¹

**TESTS FOR FATIGUE OF METAL MATERIALS (review)
Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing
and processing of results**

A review of test methods is carried out and results of fatigue tests of metal materials are presented. The analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation is presented. Deformation fatigue curves for several brands of metal materials are constructed. The method of program loading ($R_\epsilon = -1$) with step-by-step increase of sample deformation and creation of a surface in 3D-space with coordinates «lgN– σ – ϵ » and the generalized chart of cyclic deformation is proposed.

Keywords: fatigue tests, endurance, fatigue crack, deformation, Basquin–Manson–Coffin equation, program loading, chart of cyclic deformation.

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

Во второй части обзора рассмотрены особенности испытаний и анализа результатов на многоцикловую усталость. Проведен анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина, связывающего деформационные параметры петли гистерезиса с числом циклов до зарождения магистральной усталостной трещины. Построены деформационные кривые усталости с использованием постоянных величин, полученных для сталей, никелевых, титановых, алюминиевых сплавов и чугуна. Проведено сравнение методик испытаний и обработки результатов. С целью унификации получения усталостных характеристик материалов предложена методика программного жесткого нагружения ($R_\epsilon = \frac{\epsilon_{m\epsilon}}{\epsilon_{\min}} = -1$) с пошаговым увеличением деформации образца $\epsilon = F(N)$ и построением поверхности в 3D-пространстве с координатами «lgN– σ – ϵ » и обобщенной диаграммы циклического деформирования $\sigma = F(\epsilon(N))$.

* Часть 1 – см. «Авиационные материалы и технологии», №4 (61), 2020.

Результаты исследований показывают, что усталостные трещины возникают в конструкции при циклическом деформировании в результате исчерпания местной локальной пластической деформации [1–7]. Конструкция и деталь (в отличие от полированного лабораторного образца) может иметь различные поверхностные дефекты материала, что существенно снижает время зарождения трещины вследствие концентрации вокруг этих дефектов напряжений и деформаций [8–16].

При изучении механической усталости ее разделяют на две области: малоцикловую (МЦУ) и многоцикловую (МнЦУ).

Отличительной чертой малоцикловой усталости является влияние размера и формы петли механического гистерезиса на долговечность. Усталостное разрушение может быть реализовано следующими способами:

– в результате большой пластической (квазистатической) деформации – малоцикловое квазистатическое разрушение;

– от действия реверсивной упругопластической деформации, когда долго появляется, но быстро развивается до разрушения образца усталостная трещина.

Зарождение магистральной трещины происходит на поверхности и в приповерхностных слоях образца [17–29].

Многоцикловая усталость – это усталость материала, при которой усталостное повреждение происходит в основном при упругом деформировании в макрообъеме материала и пластическом деформировании в отдельном наиболее повреждаемом микрообъеме материала. Долговечность до разрушения составляет 10^7 – 10^8 циклов. Как при растяжении и малоцикловой усталости при многоцикловой усталости реализуются похожие стадии разрушения: внутризеренная неоднородность порождает неоднородность локальной деформации на микроуровне, в результате происходит образование пор и микротрещин, которые развиваются в макротрещину, рост которой приводит к разрушению материала [30–39].

Условными границами между малоцикловой и многоцикловой усталостью принято считать $\sim 5 \cdot 10^4$ циклов нагружения и напряжение, равное циклическому пределу текучести.

Особенностью развития пластической деформации и разрушения при многоцикловой усталости является их локальность и скорость протекания. Скорость развития пластической деформации существенно ниже скорости при малоцикловой усталости, пластическая деформация и разрушение реализуются в условиях объемного напряженно-деформированного состояния. Локальность начала разрушения (условия плоской деформации, подавляющей развитие пластических деформаций) подтверждают фотографии поверхности разрушения с очагом типа «рыбий глаз» («fish eye»), от которого начинает развиваться магистральная трещина. Очаг «рыбий глаз» располагается во внутренних слоях образца (рис. 1). Как правило, он начинается от концентратора напряжения в виде твердого включения: карбида, нитрида, интерметаллида. Его возникновению и развитию активно способствует диффузионно-подвижный водород [40–46].

Экспериментальное исследование повреждаемости (особенно ее начала) в отдельном наиболее повреждаемом микрообъеме материала пока практически невозможно. Наиболее чувствительным фактором изменения структуры материала и появления микродеформаций и микроразрушений является собственная резонансная частота образца [47], однако методики ее измерения в процессе усталостного испытания еще не разработаны. Машины для усталостных испытаний резонансного типа позволяют регистрировать отклонение исходной резонансной частоты силовой цепочки «образец–захваты–тяги», в составе которой наибольшие изменения происходят в рабочей части образца. Результаты исследований [47–49] показывают, что график изменения резонансной частоты силовой цепочки хорошо отражает процесс накопления пластической деформации, момент появления магистральной трещины и ее развитие.

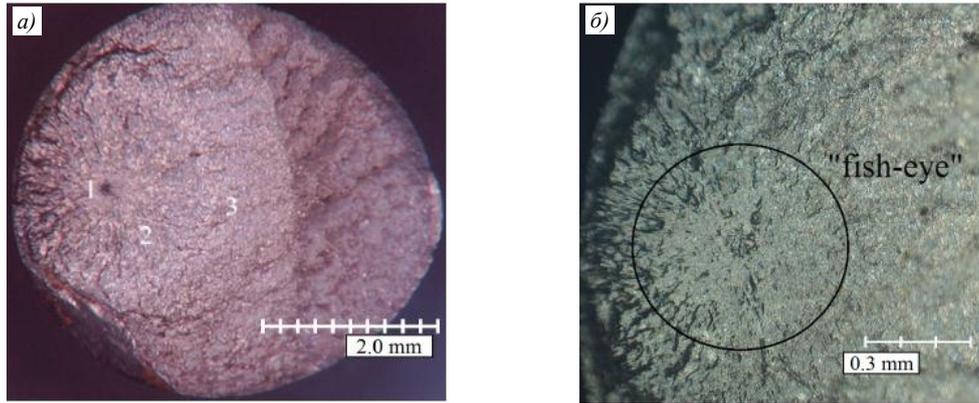


Рис. 1. Очаги разрушения типа «рыбий глаз» при многоциклового усталости («мягкое» нагружение, $R=-1$) образцов из алюминиевого сплава АМг6:

a – амплитуда напряжения цикла $\sigma_a=120$ МПа, $N=782 \cdot 10^6$ циклов; *б* – $\sigma_a=138$ МПа, $N=751 \cdot 10^6$ циклов [40]

Известен метод регистрации начала образования усталостной трещины, основанный на использовании датчиков вихревого тока, которые позволяют фиксировать очаг разрушения. Однако сложности аппаратного решения затрудняют использование данного метода.

Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина

Результаты испытания на усталость при «жестком» нагружении с коэффициентом асимметрии цикла по деформации $R_\epsilon=-1$ представляют уравнением Басквина–Мэнсона–Коффина [50, 51], связывающим деформационные параметры петли гистерезиса с числом циклов до зарождения магистральной усталостной трещины, при малоциклового усталости, близкой к числу циклов до разрушения,

$$\epsilon_a = \epsilon_y + \epsilon_p = \frac{\sigma'_f}{E} N^b + \epsilon'_f N^c, \quad (1)$$

где ϵ_a – амплитуда полной деформации; ϵ_y – упругая часть амплитуды полной деформации; ϵ_p – пластическая часть амплитуды полной деформации; σ'_f – коэффициент сопротивления усталости; E – модуль упругости; N – число циклов до зарождения магистральной усталостной трещины (при малоциклового усталости близкое к числу циклов до разрушения); b – экспонента усталостной прочности (экспонента Басквина); ϵ'_f – коэффициент усталостной пластичности; c – экспонента усталостной пластичности (экспонента Мэнсона–Коффина).

Схема на рис. 2 представляет деформационные кривые усталости в координатах $\lg \epsilon_a - \lg N$, $\lg \epsilon_y - \lg N$ и $\lg \epsilon_p - \lg N$, иллюстрирующие уравнение (1).

Выделим три характерные точки на координате $\lg N$: $\lg N=0 \rightarrow N_1=1$; $\lg N_2$, когда $\lg \epsilon'_f - c \lg N = \lg \frac{\sigma'_f}{E} - b \lg N \rightarrow \frac{\sigma'_f}{E} N^b = \epsilon'_f N^c$; $\lg N_3$ при $\lg \epsilon_a = \lg \frac{\sigma'_f}{E} - b \lg N$ и $\lg \epsilon'_f - c \lg N = 0 \rightarrow \epsilon'_f N^c = 0$.

При $N_1=1$ из формулы (1) следует, что для пластичного материала – $\epsilon_a \approx \epsilon_p \approx \epsilon'_f$, а для хрупкого материала – $\epsilon_a \approx \epsilon_y \approx \frac{\sigma'_f}{E}$. Особенностью хрупкого разрушения является быстрый рост трещин, который не требует повышающей нагрузки, для их стремительного роста достаточно запасенной упругой энергии образца [52–57].

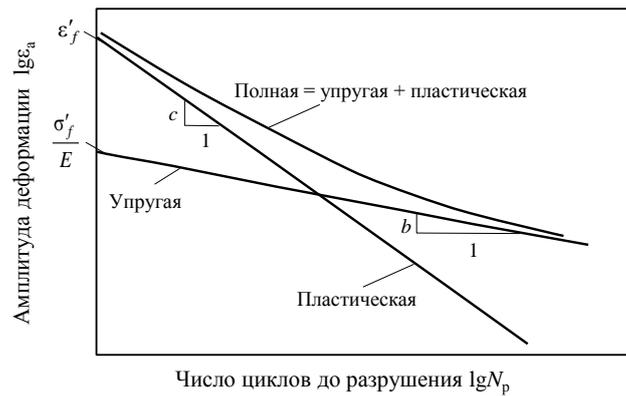


Рис. 2. Схема деформационных кривых усталости в двойных логарифмических координатах, характерная для представления результатов испытания при «жестком» нагружении с коэффициентом асимметрии цикла $R_\varepsilon = -1$ и экспериментального определения постоянных величин уравнения (1) [50]

Гистерезисная петля у пластичного материала образуется при значениях напряжения и деформации, близких к предельным значениям при статическом растяжении: $\varepsilon_a \approx \varepsilon_p \approx \varepsilon'_f \approx \varepsilon_B$, где ε_B – равномерная деформация, $\sigma_a = \sigma_B$ (рис. 3).

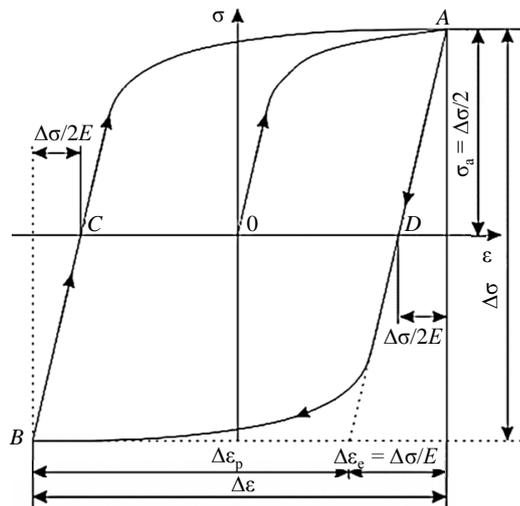


Рис. 3. Петля и параметры упругопластического гистерезиса при симметричном циклическом нагружении пластичного материала

Металлические материалы в состоянии поставки, как правило, на начальной стадии усталостного нагружения упрочняются, а на заключительной стадии – разупрочняются. Открытым остается вопрос о соответствии числа циклов до зарождения магистральной усталостной трещины форме и размерам петли гистерезиса. Критерий формы и размера петли гистерезиса, демонстрирующий образование магистральной трещины, отсутствует. Даже при малоциклового усталости, когда число N близко к числу циклов до разрушения, момент образования магистральной трещины зафиксировать трудно из-за гладкого падения напряжения цикла σ_a (рис. 4).

Экспериментально установлено, что остаточный ресурс работы на стадии развития макротрещины составляет 10–20% от общего жизненного цикла материала N_p [47–49], поэтому интерес представляют петли гистерезиса при $N \leq 0,8N_p$. На практике за показательную петлю принимают циклически стабильную петлю или петлю при $N = 0,5N_p$.

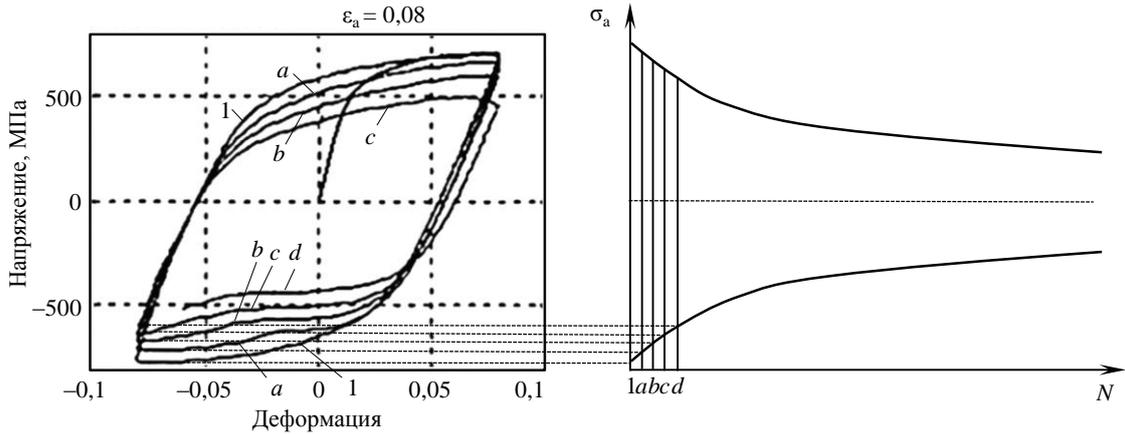


Рис. 4. Петля гистерезиса при «жестком» цикле усталостного испытания на стадии разупрочнения

Уравнение (1) показывает плавное уменьшение деформационных параметров петли гистерезиса с увеличением количества циклов до зарождения магистральной усталостной трещины. Следовательно, $N^b \leq 1$, $N^c \leq 1 \rightarrow b \leq 0$, $c \leq 0$, $|c| > |b|$ из-за большего влияния на усталость знакопеременной пластической деформации.

Уравнения $\lg \varepsilon'_f - c \lg N = \lg \frac{\sigma'_f}{E} - b \lg N$ и $\frac{\varepsilon'_f E}{\sigma'_f} = N_2^{c-b}$, если принять $\frac{\varepsilon'_f E}{\sigma'_f} \approx 10^2$

($\varepsilon_p \approx \varepsilon'_f \approx 0,5$ и $\varepsilon_y \approx \frac{\sigma'_f}{E} \approx 5 \cdot 10^{-3}$ – максимальные значения для амплитуды полной деформации ε_a), приводят к $10^2 \approx N_2^{c-b}$ и $N_2 \approx 10^{2/(c-b)}$. В формуле $N_2 \approx 10^{2/(c-b)}$ параметры c и b имеют положительные значения.

Для определения N_3 получаем, что равенство $\varepsilon'_f N^c = 0$ строго выполняется при $\varepsilon'_f = 0$ и $\varepsilon'_f N^c \rightarrow 0$, когда N_3 стремится к бесконечности.

Для определения напряжения, соответствующего значению полной деформации, используют уравнение Рэмберга–Осгуда для представления кривой циклического деформирования (2), аналогичное по строению уравнению Рэмберга–Осгуда для статического деформирования растяжением (3):

$$\varepsilon_a = \varepsilon_y + \varepsilon_p = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{1/n'} ; \tag{2}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n, \tag{3}$$

где ε_a – амплитуда полной деформации; ε_y – упругая часть амплитуды полной деформации в уравнении (2) или упругая деформация в уравнении (3); ε_p – пластическая часть амплитуды полной деформации в уравнении (2) или пластическая деформация в уравнении (3); σ_a – напряжение, вызванное ε_a ; E – модуль упругости; K' – коэффициент циклической прочности; n' – коэффициент циклического деформационного упрочнения; ε – полная деформация при растяжении; σ – напряжение при растяжении; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; n – коэффициент упрочнения.

При симметричном циклическом «жестком» деформировании из уравнений (1) и (2) оценим параметры σ'_f , ε'_f , b и c . Приняв $N_1=1$, получим $\sigma'_f = K'(\varepsilon'_f)^{n'} = \sigma_a = \sigma_B$. Петля гистерезиса на цикле N подчиняется зависимостям (4) и (5):

$$\varepsilon_{aN} = \varepsilon_{yN} + \varepsilon_{pN} = \frac{\sigma_{aN}}{E} + \left(\frac{\sigma_{aN}}{K'} \right)^{1/n'}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{aN} = \varepsilon_{yN} + \varepsilon_{pN} = \frac{\sigma_f}{E} N^b + \varepsilon'_f N^c, \quad (5)$$

из которых получаем равенство $b=cn'$, если допустить независимость постоянных величин K' и n' от количества циклов нагружения. С учетом того, что $b \leq 0$, $c \leq 0$, $|c| > |b|$, получим $0 \leq n' \leq 1$. Постоянную b можно определить по методике, представленной на рис. 2, или с помощью стабильной (показательной) гистерезисной петли на цикле нагружения N из равенства $b = (\lg \sigma_{aN} - \lg \sigma'_f) / \lg N$. Постоянную величину c также определяют по методике, представленной на рис. 2, или с помощью стабильной гистерезисной петли на цикле нагружения N из равенства $c = (\lg \sigma_{aN} - \lg K' - n' \lg \varepsilon'_f) / n' \lg N$.

Экспериментальные средние значения σ'_f , ε'_f , b и c , полученные при циклическом нагружении большого количества образцов из металлических сплавов (стали; алюминиевые, титановые и никелевые сплавы; чугуны), приведены в табл. 1 [50, 51]. Эти значения соответствуют амплитуде напряжения σ_a , при которой долговечность образцов равнялась 10^3 циклов.

Таблица 1

Экспериментальные средние значения постоянных величин деформационных кривых сопротивления усталости

Материал	Значения постоянных величин						$E \cdot 10^{-5}$, МПа
	σ_a	σ'_f	σ_B , МПа	ε'_f	b	c	
Стали	$0,76\sigma_B$	$1,5\sigma_B$	1000	0,45	-0,09	-0,59	2,05
Алюминиевые сплавы	$0,82\sigma_B$	$1,9\sigma_B$	440	0,28	-0,11	-0,66	0,71
Титановые сплавы	$0,89\sigma_B$	$1,9\sigma_B$	1100	0,50	-0,10	-0,69	1,08
Никелевые сплавы	$0,76\sigma_B$	$1,4\sigma_B$	1000	0,15	-0,08	-0,59	2,11
Чугуны	$0,65\sigma_B$	$1,2\sigma_B$	700	0,04	-0,08	-0,52	1,40

Анализ значений параметров уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина, представленных в табл. 1, показывает, что значения коэффициента сопротивления усталости σ'_f завышены. Теоретически, при «жестком» нагружении $\sigma'_f = \sigma_a = \sigma_B$. Значение коэффициента усталостной пластичности ε'_f логично растет с увеличением пластичности материалов. Экспоненты усталостной прочности b и усталостной пластичности c достаточно стабильны. Значение $N_2 \approx 10^{2/(c-b)} \approx 10^4$ при $\frac{\varepsilon'_f E}{\sigma'_f} = N_2^{c-b}$ близко к значению $\sim 5 \cdot 10^4$ циклов, т. е. к значению на границе между малоцикловогой и многоцикловогой усталостью.

Знание постоянных величин деформационных кривых усталости позволяет:

- построить деформационные кривые сопротивления усталости без проведения длительных циклических испытаний;
- прогнозировать характеристики сопротивления усталости на больших базах при малом числе циклов нагружения;
- проводить экспресс-оценку влияния технологических и эксплуатационных факторов на характеристики сопротивления усталости.

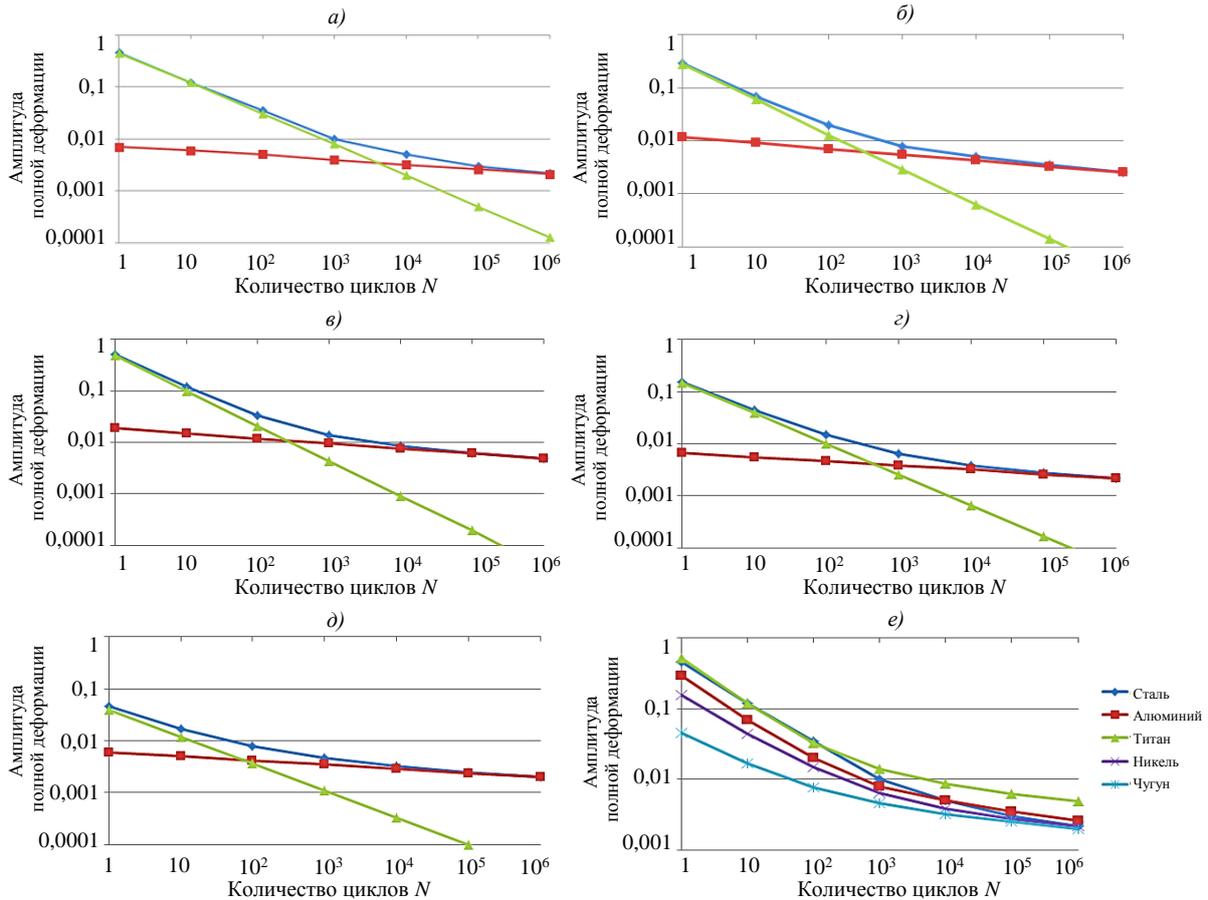


Рис. 5. Деформационные кривые сопротивления усталости металлических материалов в двойных логарифмических координатах (обозначения кривых на *a–d* – см. рис. 2) для стали (*a*); алюминиевых (*б*), титановых (*в*) и никелевых сплавов (*з*); чугунов (*д*), а также графики зависимости амплитуды полной деформации (*е*)

Деформационные кривые сопротивления усталости с использованием постоянных величин, представленных в табл. 1, показаны на рис. 5. В порядке уменьшения значений сопротивления усталости исследованные сплавы располагаются в ряд: титановые сплавы, стали, алюминиевые сплавы, никелевые сплавы, чугуны. Наибольшее сопротивление усталости оказывают сплавы с высокими значениями коэффициента усталостной пластичности ϵ'_f , т. е. способные к пластическому деформированию.

Методики испытаний и обработки результатов

Методики проведения и обработки результатов усталостных испытаний при «жестком» нагружении наиболее полно представлены в стандартах [58–61]. Стандарты содержат следующие основные разделы: «Образцы», «Характеристики оборудования», «Проведение испытаний», «Методология». В стандартах приведены чертежи образцов с круглым или прямоугольным сечением. С учетом высокой чувствительности характеристик сопротивления усталости к концентрации напряжений, предпочтение следует отдавать образцам с круглым сечением, в которых отсутствует концентрация напряжений за счет геометрической формы поперечного сечения образца. Необходимость регистрации петли гистерезиса при испытаниях на МЦУ диктует применение гладких образцов (без концентраторов напряжений). Для исключения потери устойчивости при

сжатию рекомендуется применять образцы с укороченной, по сравнению со стандартными образцами на растяжение, рабочей базой [62–64]. Эскизы образцов для испытания на усталость при «жестком» нагружении в соответствии со стандартом [60] представлены на рис. 6. Внешний вид образца для таких испытаний в авиационной промышленности России приведен на рис. 7.

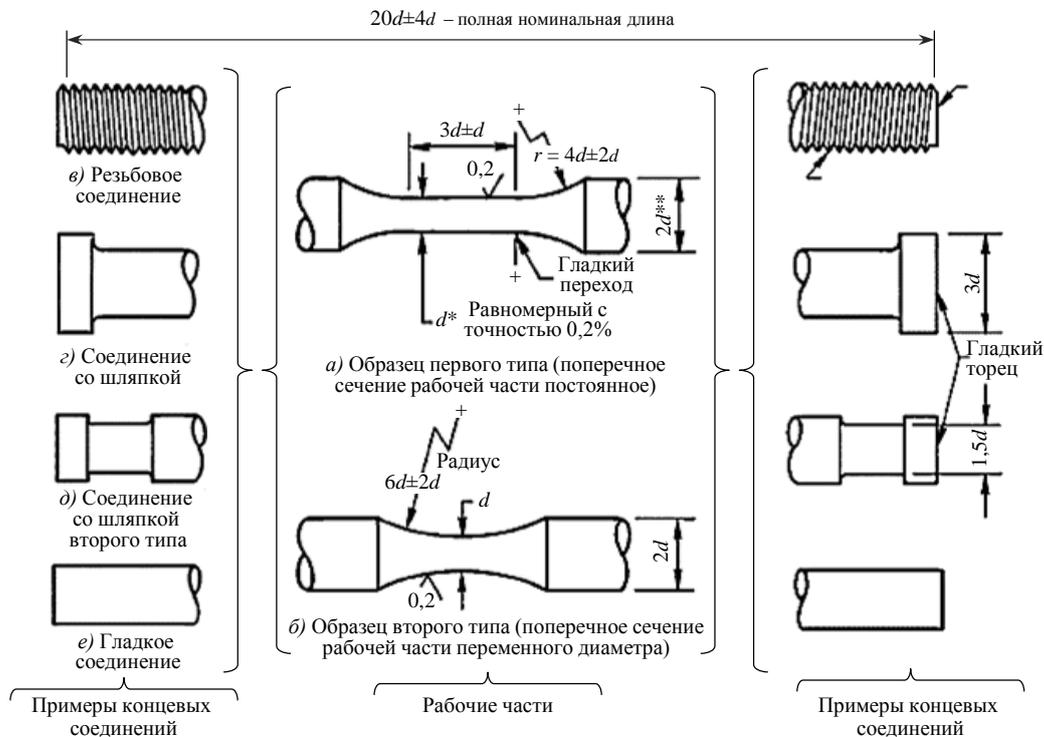


Рис. 6. Образцы, рекомендуемые для проведения испытаний на малоцикловую усталость в стандарте [60]

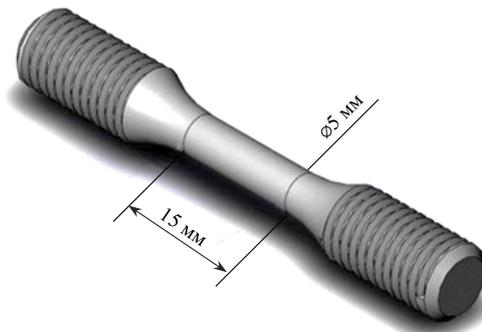


Рис. 7. Образец для испытания на усталость при «жестком» нагружении, используемый в авиационной промышленности России

Его отличает меньший размер диаметра рабочей части $\varnothing 5,0$ мм, в стандарте [60] минимальный диаметр равен 6,35 мм. Следует обратить внимание на высокие требования, предъявляемые к состоянию поверхности рабочей части образца.

В приложении к стандарту [60] приведен пример технологии финальной механической обработки поверхности рабочей части образца, при которой требуется полировка поверхности только в направлении вдоль оси образца с давлением, исключая появление в поверхностных слоях образца значительных остаточных напряжений.

Рекомендуется проводить подготовку поверхности образца таким образом, чтобы минимизировать влияние данного фактора на значение усталостной выносливости серии испытываемых образцов. Процедура подготовки образца должна быть четко и подробно задокументирована. Рекомендуется также определить и зарегистрировать остаточные поверхностные напряжения и их вид по крайней мере для одного образца из серии. Образцы из материала, подверженного коррозии во влажной атмосфере при комнатной температуре, должны быть помещены в защищающую их упаковку на период хранения сразу после проведения процедуры подготовки. Метод хранения должен быть подробно задокументирован. Для получения кривой сопротивления усталости рекомендуется проведение испытаний не менее десяти образцов.

В разделе «Характеристики оборудования» приведены требования, которым должны соответствовать испытательные машины и приспособления для измерения деформации непосредственно на рабочей базе образца. В табл. 2 представлены значения допускаемых погрешностей измерения деформации и нагрузки [64], которые показывают, что испытательные машины и приспособления для измерения деформации и контроля соосности образца оси нагружения являются наиболее совершенными из современной испытательной техники. Предпочтительным является использование машин с высоким уровнем осевой жесткости. Они должны обладать специальными подгружаемыми захватами, исключаяющими появление зазоров в захватных частях образца при его испытании на усталость растяжением-сжатием. Усилие поджима должно быть в 2 раза больше максимальной ожидаемой нагрузки сжатия в ходе испытания во избежание люфтов. Машины должны иметь программируемое выравнивающее устройство для сведения к минимуму деформаций изгиба образца. Компьютерное управление испытательной машиной должно обеспечивать выполнение цикла в пределах заданной деформации. При задании верхнего и нижнего пределов деформации, разница значений пределов в течение всего испытания не должна превышать 1% от значений заданных пределов.

Таблица 2

Допускаемые погрешности измерения деформации и нагрузки

Стандарт	Допускаемые пределы отклонения параметров испытания, %	
	по деформации	по нагрузке
ГОСТ 25.502–79 [58]	±3	±(2–5)
ASTM E606/E606M-19 [60]	±1	±1
ASTM E466-15 [65]	–	±2

Разделы «Проведение испытаний» и «Методология» наиболее подробно представлены в стандарте [60]. Следует отметить высокое качество этого стандарта, являющегося руководством к проведению всесторонней научно-исследовательской работы, включающей фрактографические исследования разрушенных образцов. Методики обработки полученных результатов испытаний приведены в стандартах [65, 66].

Скорость деформирования при комнатной температуре должна быть не менее 10^{-3} с^{-1} , т. е. для образца с базой 25 мм составлять $\geq 1,5 \text{ мм/мин}$. Верхний предел скорости деформирования ограничен требованием, чтобы являющийся следствием этого нагрев образца не превышал $50 \text{ }^\circ\text{C}$ [58]. Предпочтительно использование пилообразного или синусоидального цикла деформирования. Форма цикла должна быть неизменной на протяжении всего испытания.

Предложены следующие критерии завершения испытания.

– *Разрушение* – полное разделение образца на две части в некоторой области рабочей части образца; место разрушения должно быть зафиксировано.

– *Отношение модулей* – для любого числа циклов N в течение цикла модуль разгрузки, следующего за пиком растягивающего напряжения, определяется как E_{NT} , а модуль нагружения, следующего за пиком сжимающего напряжения, определяется как E_{NC} (рис. 8). Критерий разрушения в этом случае имеет вид:

$$Q_N = E_{NT}/E_{NC}; \quad (6)$$

$$Q_{N_f} = 0,5Q_1, \quad (7)$$

где Q_1 – величина коэффициента для первого цикла; N_f – количество циклов до разрушения.

– *Микрорастрескивание* – присутствие микротрещин на поверхности, размер которых превышает заданную ранее величину, зависящую от целей испытания.

– *Снижение исходного напряжения растяжения* – в данном случае разрушение определяют как неспособность образца выдерживать растягивающее напряжение. Считается, что разрушение имеет место в момент, когда уровень максимального напряжения снижается на ~50% вследствие наличия трещин или растрескивания (рис. 4).

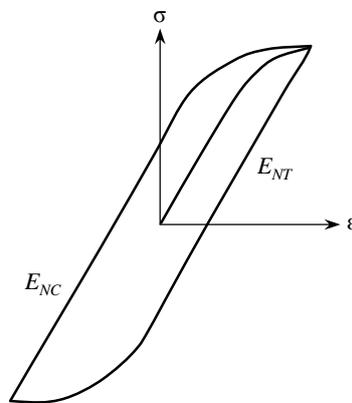


Рис. 8. Определения модулей E_{NT} и E_{NC} для определения разрушения

Кривую циклического деформирования строят по значениям величины напряжения и деформации на середине жизненного цикла материала или при стабилизации петли гистерезиса.

Кривую сопротивления усталости «полная деформация–количество циклов по каждому критерию завершения испытания» представляют в двойных логарифмических координатах.

После разрушения рекомендуется проводить металлографическое исследование разрушенных образцов и фрактографическое исследование обеих поверхностей разлома на предмет выявления необычных причин разрушения, которые могут поставить под сомнение результаты испытаний.

Благодаря контролю основного усталостного повреждающего материала фактора – знакопеременной пластической деформации – испытание при «жестком» цикле нагружения с коэффициентом асимметрии цикла по деформации $R_\epsilon = -1$ можно использовать в качестве основного испытания при исследовании усталости металлических материалов. Интересным для исследования процесса усталости может быть использование программного «жесткого» нагружения с пошаговым увеличением в каждом новом цикле деформации образца. Как в работах [67, 68], можно использовать преимущества программного «жесткого» нагружения с пошаговым увеличением деформации образца, например на $10^{-2}\%$, для сокращения времени испытаний и количества образцов. На рис. 9 приведена схема представления результатов такого испытания в трехмерной системе координат « $\lg N - \sigma - \epsilon$ » [69–71].

Для построения трехмерных диаграмм деформирования по результатам усталостных испытаний необходимо получить массив данных по параметрам: напряжение, деформация, количество циклов нагружения. Полученный массив данных загружается в программу ANSYS Mechanical APDL, который позволяет построить практически любую точную геометрическую форму, используя удобный графический интерфейс пользователя или параметрический язык проектирования APDL [72–79].

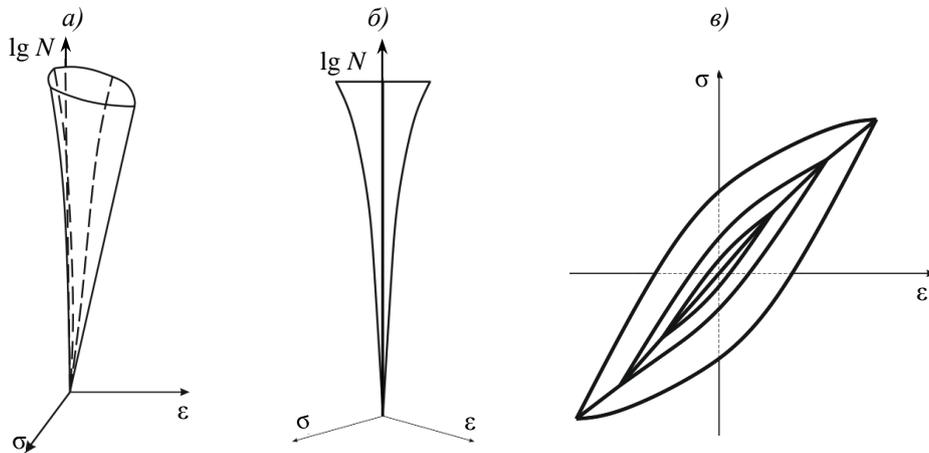


Рис. 9. Трехмерная модель представления результатов испытания на усталость при «жестком» нагружении с пошаговым увеличением в каждом новом цикле деформации образца: *a* – вид в изометрии; *б* – вид по направлению 45 градусов к осям σ и ϵ ; *в* – вид сверху

Проекции петель гистерезиса на плоскость σ – ϵ наглядно представляют изменения диаграмм циклического нагружения с увеличением деформации образца. Построенная поверхность усталости в сочетании с обобщенной диаграммой циклического деформирования $\sigma=F(\epsilon(N))$ представляют способность материала сопротивляться усталостному нагружению на каждом цикле, выделять участки стабильного состояния, упрочнения и разупрочнения. Их можно использовать в качестве своеобразной диаграммы растяжения с целью унификации характеристик сопротивления усталости материалов.

Представляет интерес поиск с помощью уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина и уравнения Рэмберга–Осгуда зависимостей между характеристиками сопротивления усталости, определяемыми при «жестком» и «мягком» нагружении, так как при эксплуатации многие конструкции подвержены постоянным нагрузкам, т. е. работают в условиях «мягкого» цикла нагружения.

Заключения

Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина показывает, что значения коэффициента сопротивления усталости завышены. Знание постоянных величин деформационных кривых сопротивления усталости позволяет построить эти кривые без проведения длительных циклических испытаний, прогнозировать характеристики сопротивления усталости на больших базах при малом числе циклов нагружения, а также проводить экспресс-оценку влияния технологических и эксплуатационных факторов на характеристики сопротивления усталости.

Предложено строить диаграммы циклического деформирования в трехмерной системе координат « $\lg N$ – σ – ϵ ». Поверхность усталости в сочетании с обобщенной диаграммой циклического деформирования $\sigma=F(\epsilon(N))$ представляют способность материала сопротивляться усталостному нагружению на каждом цикле, выделять участки

стабильного состояния, упрочнения и разупрочнения. Их можно использовать в качестве своеобразной диаграммы растяжения с целью унификации характеристик сопротивления усталости материалов.

Результаты исследований, приведенные в данном обзоре, показывают, что усталость металлических материалов – явление многофакторное. Повышение характеристик сопротивления усталости возможно только при рациональном сочетании мер конструктивных и собственно металлургических, поэтому актуальным является развитие методик испытаний образцов для оценки способности конструкционного материала сопротивляться усталости. Перспективной для разработки такого метода может быть предложенная методика испытания на усталость с использованием программного «жесткого» нагружения с пошаговым увеличением деформации образца.

Другим направлением является исследование сопротивления усталости образцов с конструкционными концентраторами напряжений в условиях, имитирующих условия эксплуатации.

Библиографический список

1. Yang Y., Zhang W., Yongming L. Existence and insufficiency of the crack closure for fatigue crack growth analysis // *International Journal of Fatigue*. 2014. Vol. 62. P. 144–153.
2. Большухин М.А., Зверев Д.Л., Кайдалов В.Б. и др. Оценка долговечности конструкционных материалов при совместных процессах малоциклового и многоциклового усталости // *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 28–35.
3. Sander M., Richard H.A. Fatigue crack growth under variable amplitude loading. Part I: experimental investigations // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2006. No. 29. P. 291–301.
4. Коллеров М.Ю., Гусев Д.Е., Шаронов А.А., Гуртовой С.И. Циклическая долговечность имплантатов из сплава на основе никелида титана // *Металлы*. 2009. №6. С. 85–92.
5. Potter J.M. The effect of load interaction and sequence on the fatigue behavior of notched coupons // *Cyclic stress-strain behavior – analysis, experimental, and failure prediction*. ASTM International, 1973. P. 109–132.
6. Furuya Y., Hirukawa H., Takeuchi E. Gigacycle fatigue in high strength steels // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2019. Vol. 20 (1). P. 643–656.
7. Райхер В.Л. Усталостная повреждаемость. М.: Изд-во МАТИ, 2006. 238 с.
8. Suneung A., Mendel M.B. Fatigue life model for crack propagation under variable-amplitude load // *Mechanics Research Communications*. 1995. Vol. 22 (1). P. 95–101.
9. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоциклового нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
10. Нешпор Г.С., Кудряшов В.Г., Микляев П.Г. Влияние условий нагружения на распространение усталостных трещин в листовых образцах из сплава Д16Т // *Проблемы прочности*. 1972. №8. С. 66–68.
11. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник: в 2 ч. Киев: Наукова думка, 1987. Ч. 1. 347 с.
12. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник: в 2 ч. Киев: Наукова думка, 1987. Ч. 2. 832 с.
13. Schijve J. Fatigue crack closure: Observations and technical significance // *Mechanics of Fatigue Crack Closure*. ASTM International, 1988. P. 5–35.
14. Elber W. The significance of fatigue crack closure // *Damage tolerance in aircraft structures*. ASTM International, 1971. P. 230–242.
15. Емельянов О.В., Лядецкий И.А. Определение характеристик сопротивления стали развитию трещин при циклическом изменении нагрузки // *Строительные материалы и изделия: межвуз. сб. науч. тр.* Магнитогорск: МГТУ, 2002. С. 300–308.
16. Савкин А.Н., Бадиков К.А., Седов А.А. Фрактографический анализ продвижения усталостных трещин при регулярном циклическом нагружении с перегрузками в алюминиевом сплаве 2024-T3 // *Известия ВолгГТУ. Сер.: Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении*. 2018. №3 (213). С. 94–101.

17. Вахромеев А.М. Определение циклической долговечности материалов и конструкций транспортных средств: метод. указания. М.: МАДИ, 2015. 64 с.
18. Штремель М.А. О единстве в многообразных процессах усталости // Деформация и разрушение материалов. 2011. №6. С. 1–12.
19. Терентьев В.Ф. Полная кривая усталости металлов и сплавов // Технология металлов. 2004. №6. С. 12–16.
20. 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.
21. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Материалы для сложных технических устройств арктического применения // Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
22. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
23. 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 (74). С. 118–122.
24. Орлов М.Р., Морозова Л.В., Терехин А.М., Наприенко С.А., Автаев В.В. Исследование влияния химико-термической обработки на сопротивление многоциклового усталости стали 20Х3МВФ в условиях асимметричного цикла нагружения // Деформация и разрушение материалов. 2015. №12. С. 18–24.
25. Гриневич А.В., Луценко А.Н., Каримова С.А. Долговечность изделий и коррозионная усталость конструкционных материалов // Вопросы материаловедения. 2013. №1 (73). С. 220–229.
26. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.
27. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН–ЦИАМ, 2013. 515 с.
28. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. 254 с.
29. Гурьев А.В., Митин В.Я. Особенности развития локальных микронеоднородных деформаций и накопление усталостных повреждений в углеродистых сталях // Проблемы прочности. 1978. №11. С. 19–23.
30. Вейбул В. Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964. 275 с.
31. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: справочник. М.: Металлургия, 1978. 304 с.
32. Бойцов Г.В. О взаимосвязи стадии зарождения и кинетики развития усталостного разрушения // Механика разрушения, надежность и техническая диагностика тонкостенных конструкций: межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 1996. С. 9–16.
33. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. Самара: СГТУ, 2008. 387 с.
34. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов: авиационный справочник. М.: ОАК–ЦАГИ, 2013. 302 с.
35. Белов В.К., Рудзей Г.Ф., Калюта А.А. Повышение усталостной долговечности заклепочных и сварных соединений авиационных конструкций технологическими методами. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 180 с.
36. Коллеров М.Ю., Ильин А.А., Гусев Д.Е., Ламзин Д.А. Влияние механизмов деформации на усталостные свойства металлических материалов // Металлы. 2008. №5. С. 72–79.
37. Романов А.Н. Проблемы материаловедения в механике деформирования и разрушения на стадии образования трещин. Часть 14. Связь статических и циклических свойств конструкционных материалов // Вестник научно-технического развития. 2017. №4 (116). С. 31–43.
38. Махутов Н.А. Малоцикловая усталость // Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. М.: Машиностроение, 2010. Т. II-1: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. С. 217–285.
39. Трошенко В.Т., Хамаза Л.А. Усталость и неупругость металлов // Proceedings of XIII International Colloquium «Mechanical fatigue of metals». 2006. No. 6. P. 9–22.
40. Билалов Д.А., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Влияние интерметаллидных включений на образование подповерхностных трещин в сплаве АМг6 при гигацикловой усталости // Letters on Materials. 2020. Vol. 10 (2). P. 206–210. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-206-210.

41. Банников М.В., Банникова И.А., Уваров С.В., Наймарк О.Б. Аномалия упругих свойств металлов при гигацикловом нагружении металлов и кинетика развития поврежденности // Вестник Пермского университета. Сер.: Физика. 2017. №4 (38). С. 63–70. DOI: 10.17072/1994-3598-2017-4-63-70.
42. Банников М.В., Оборин В.А., Наймарк О.Б. Исследование стадийности разрушения титановых сплавов в режиме много- и гигацикловой усталости на основе морфологии поверхности разрушения // Вестник ПНИПУ. Сер.: Механика. 2015. №3. С. 15–24. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.02.
43. Гриневич А.В., Румянцев Ю.С., Морозова Л.В., Терехин А.Л. Исследование усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163-Т и В950.ч.-Т2 после поверхностного упрочнения // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 93–102. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102.
44. Антипов А.А., Горохов А.Н., Горохов В.А., Казаков Д.А., Капустин С.А. Экспериментально-теоретическое исследование усталости материалов и конструкций в условиях высокотемпературных многоцикловых нагружений // Проблемы прочности и пластичности. 2014. Вып. 76 (1). С. 26–38.
45. Петухов А.Н. Об особенностях возникновения и развития усталостных трещин в деталях ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. №9 (25). С. 56–62.
46. Прохоров А.Е., Плехов О.А. Экспериментальное исследование процесса разрушения стали 40Х13Т в режиме гигацикловой усталости // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2018. Т. 26. №4. С. 125–132. DOI: 10.31242/2618-9712-2018-26-4-125-132.
47. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В. Об оценке повреждаемости металлических материалов методами механических испытаний // Деформация и разрушение материалов. 2015. №3. С. 42–47.
48. Ерасов В.С., Рудаков А.Г., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Образование магистральной трещины в процессе испытания на усталость // Сб. докл. конф. «Фундаментальные исследования в области защиты от коррозии, старения, биоповреждений материалов и конструкций в различных климатических условиях и природных средах, с целью обеспечения безопасной эксплуатации сложных технических систем». М.: ВИАМ, 2013. С. 10–13.
49. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневич А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость // Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2020).
50. Трошенко В.Т., Хамаза Л.А. Деформационные кривые усталости сталей и методы определения их параметров. Сообщение 1. Традиционные методы // Проблемы прочности. 2010. №6. С. 26–43.
51. Трошенко В.Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 3. Деформационные и энергетические критерии // Проблемы прочности. 2006. №1. С. 5–31.
52. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Площадь свободной поверхности как критерий хрупкого разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 69–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-69-79.
53. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения // Труды ВИАМ. 2017. №10 (58). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-11-11.
54. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Причины зависимости механических характеристик трещиностойкости материала от размеров образца // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 56–64. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-56-64.
55. Подживотов Н.Ю., Ерасов В.С., Орешко Е.И. О методах оценки статической прочности материалов, полученных с помощью аддитивных технологических процессов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. №10. С. 54–59.
56. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Образование новых поверхностей в твердом теле на стадиях упругой и пластической деформаций, начала и развития разрушений // Труды ВИАМ. 2018. №2 (62). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-12-12.
57. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Коэффициент Пуассона и пуассонова сила // Авиационные материалы и технологии. 2018. №4 (53). С. 79–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-79-86.

58. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Стандартиформ, 2005. 25 с.
59. ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М.: Стандартиформ, 1988. 132 с.
60. ASTM E606/E606M-19. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. American Society for Testing and Materials, 2018. 16 p.
61. ISO 12106:2017. Metallic materials – Fatigue testing – Axial-strain-controlled method. ICS 77.040.10 Mechanical testing of metals. 2017. 38 p.
62. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
63. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
64. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов // Труды ВИАМ. 2014. №9 (11). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-11-11.
65. ASTM E466-15. Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials, 2015. 6 p.
66. ASTM E739-10. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data. American Society for Testing and Materials, 2015. 7 p.
67. Ерасов В.С., Автаев В.В., Орешко Е.И., Яковлев Н.О. Преимущества «жесткого» нагружения при испытаниях на статическое и повторно-статическое растяжение // Труды ВИАМ. 2018. №9 (69). Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 23.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104.
68. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Кратковременная ползучесть при мягком и жестком нагружении // Материаловедение. 2019. №6 (267). С. 11–17.
69. Петушков В.Г. Применение взрыва в сварочной технике. Киев: Наукова думка, 2005. С. 85–86.
70. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Крылов В.Д. Построение трехмерных диаграмм деформирования для анализа механического поведения материала, испытанного при различных скоростях нагружения // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2 (51). С. 59–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-59-66.
71. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Ястребов А.С. Прогнозирование прочностных и деформационных характеристик материалов при испытаниях на растяжение и ползучесть // Материаловедение. 2019. №2. С. 3–8.
72. Вальгер С.А., Федоров А.В., Федорова Н.Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохобтекаемых тел с использованием ПК ANSYS // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. №5. С. 27–40.
73. Мишин В.А., Маклаков С.Ф. Моделирование распределения напряжений при наличии концентраторов с использованием ANSYS // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2019. №4. С. 81–84.
74. Черпаков А.В., Шиляева О.В., Зеньковский И.А. и др. Параметрическое моделирование плиты перекрытия в комплексе ANSYS // Инженерный вестник Дона. 2019. №7 (58). С. 40.
75. Усманова Р.Р. Анализ контактных напряжений зубчатого зацепления в программном комплексе ANSYS // Научные технологии в машиностроении: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Уфа, 2020. С. 207–211.
76. Ефрюшин С.В., Юрьев В.В. Математическое моделирование несущей способности железобетонных конструкций при пожаре с применением ПК ANSYS Mechanical // Строительная механика и конструкции. 2020. Т. 2. №25. С. 78–85.
77. Кожанов Д.А., Любимов А.К. Моделирование гибких тканых композитов в системе ANSYS Mechanical APDL // Компьютерные исследования и моделирование. 2018. Т. 10. №6. С. 789–799.
78. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н. Критические напряжения потери устойчивости в гибридных слоистых пластинах // Материаловедение. 2016. №11. С. 17–21.
79. Орешко Е.И., Ерасов В.С. Численные исследования устойчивости пластин с шарнирно закрепленными поперечными кромками // Деформация и разрушение материалов. 2018. №6. С. 7–11.