

УДК 620.178.35

В.С. Ерасов¹, Е.И. Орешко¹**ИСПЫТАНИЯ НА УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)****Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний**

DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70

Проведен обзор по методикам проведения испытаний и представлены результаты испытаний металлических материалов на усталость. Показано, что малоцикловая усталость проходит в условиях упругопластической деформации в микрообъеме материала с первых циклов нагружения. Ее отличительной чертой является влияние на долговечность размера и формы петли механического гистерезиса. Зарождение усталостных микротрещин и образование магистральной трещины происходит на поверхности и в приповерхностных слоях образца.

Ключевые слова: усталостные испытания, выносливость, усталостная трещина, циклическая трещиностойкость, деформация.

V.S. Erasov¹, E.I. Oreshko¹**FATIGUE TESTS OF METAL MATERIALS (review)****Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests**

The article gives the review of techniques of fatigue tests of metal materials and presents the results of such tests. It has been shown that the low-cyclic fatigue occurs in conditions of elastoplastic deformation in material microvolume from the first cycles of loading. Its distinctive feature is influence on durability of the size and form of a mechanical hysteresis loop. Nucleation of fatigue microcracks and formation of the main crack occurs on the surface and in near-surface layers of a sample.

Keywords: fatigue tests, endurance, fatigue crack, cyclic fracture strength, 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

При разработке конструкционного материала необходимо проводить оценку его физико-механических характеристик [1–6]. Важное место среди них занимают характеристики сопротивления усталости, позволяющие оценить работоспособность материала в условиях повторных и знакопеременных нагрузок и деформаций [7–9].

Усталость металлического материала – физическое явление кинетического процесса зарождения, накопления и роста несплошностей под действием циклически изменяющейся нагрузки или деформации. Это многофакторный процесс, который развивается на нескольких структурных уровнях с участием конкурирующих между собой микромеханизмов [10]. Следует заметить, что далеко не всегда интегральный результат их действия становится наблюдаемым с начального момента формирования магистральной трещины. Трещины усталости создают условия для

хрупкого разрушения [11–14]. Процесс усталости можно разделить на две стадии: рассеянного усталостного повреждения и локализованного усталостного повреждения, когда процесс усталости определяется развитием магистральной усталостной трещины (циклической трещиностойкостью), приводящей к окончательному разрушению. Стадия рассеянного усталостного повреждения является более продолжительной по отношению к стадии локализованного усталостного повреждения. Усталостное разрушение конструкций опасно внезапностью и высокой скоростью протекания на заключительном этапе стадии трещиностойкости. Катастрофы железнодорожных мостов и локомотивов, поездов, самолетов, энергетических турбин являются примерами таких разрушений уже на протяжении двух столетий [7–9].

Усталостные характеристики конструкционных металлических материалов занимают важное место в перечне механических

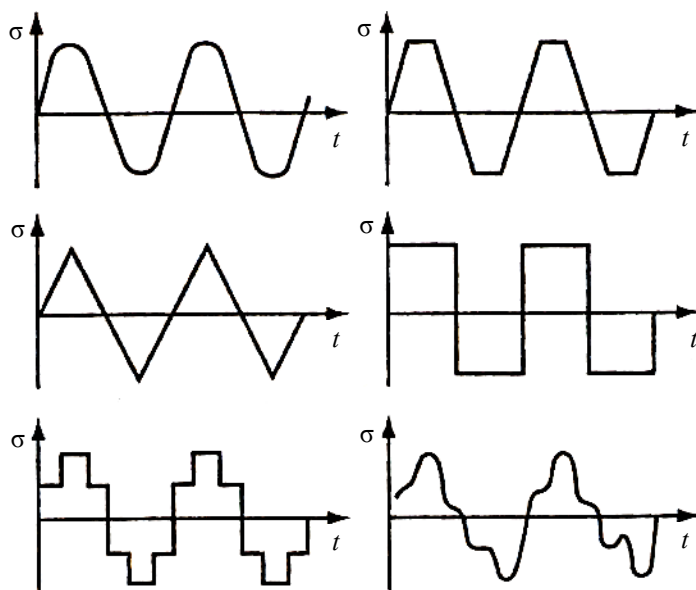


Рис. 1. Различные формы циклов напряжений при «мягком» нагружении (при замене на графиках напряжения σ на относительную деформацию ϵ реализуют «жесткий» режим нагружения) [9]

характеристик, так как основным видом нагружения деталей и конструкций являются повторные и знакопеременные нагрузки или деформации. Активно исследуют проблему определения момента накопления повреждений, при котором возможно обращение этого процесса в обратную сторону – «вылечивание» детали восстановительной термообработкой.

В обзоре рассмотрены основные параметры циклов нагружения и различные формы циклов при «мягком» и «жестком» нагружении, рассмотрена петля механического гистерезиса в качестве характеристики усталостных испытаний.

Материалы и методы

Для испытания на усталость полуфабрикатов металлических материалов и деталей из них изготавливают специальные образцы. Испытания образцов проводят при «мягком» или «жестком» нагружении. Основными параметрами циклов нагружения являются их форма (закон нагружения), амплитуда напряжения σ (рис. 1) или амплитуда деформации ϵ , коэффициент асимметрии цикла $R_\sigma = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ (рис. 2) при «мягком» нагружении или $R_\epsilon = \epsilon_{\min} / \epsilon_{\max}$ при «жестком» нагружении, частота нагружения [9]. Параметры цикла выбирают исходя из условий эксплуатации

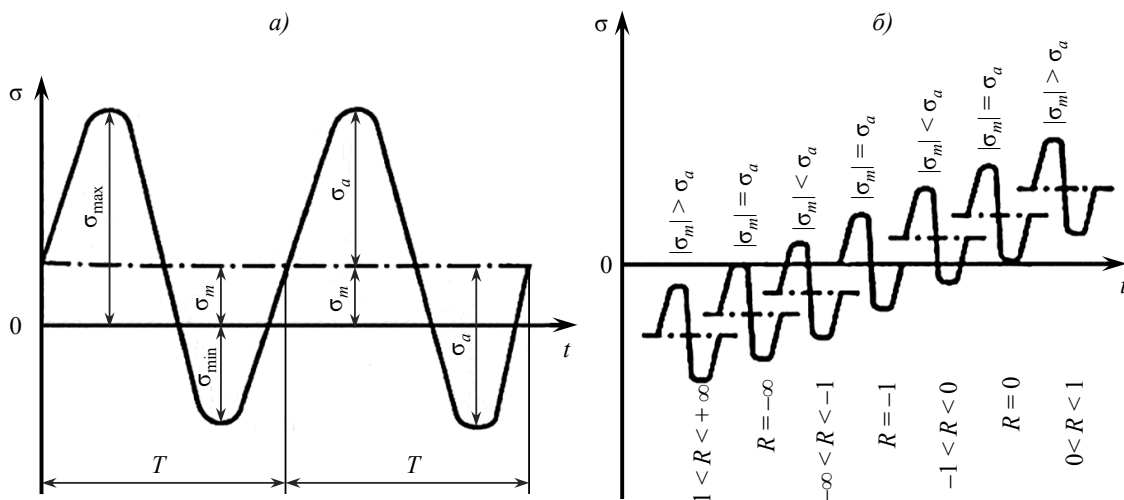


Рис. 2. Основные параметры синусоидального цикла при усталостных испытаниях (а – закон нагружения; б – циклы напряжений и соответствующие им значения коэффициентов асимметрии цикла) [9]

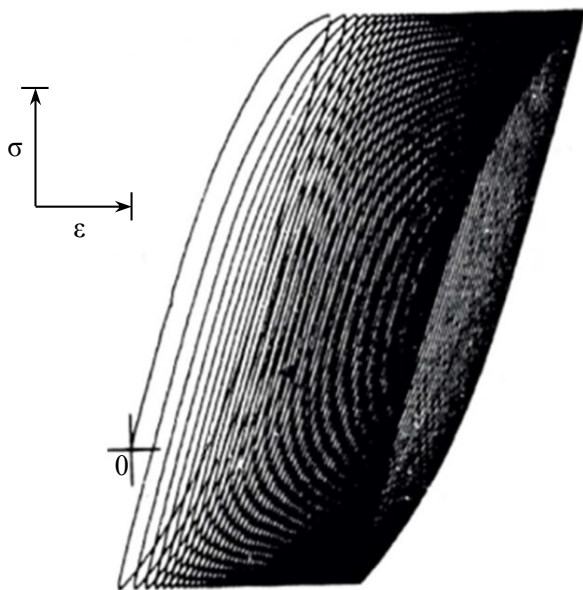


Рис. 3. Циклическая ползучесть при низкочастотном «мягком» усталостном нагружении

материала в конструкции и возможностей испытательной техники.

Широко применяют синусоидальный цикл и пилообразные циклы без выдержки или с выдержкой при экстремальных значениях. На современных испытательных машинах (даже при наличии сложного цикла эксплуатации конструкции) возможно его повторение в условиях испытания образца. Тем самым достигают соответствия условий определения усталостных характеристик материала условиям эксплуатации конструкции из него.

При исследованиях усталостных свойств материалов при одинаковых значениях σ_{\max} самым опасным видом нагружения является нагружение с коэффициентом асимметрии цикла $R_{\sigma} = -1$. Такой цикл называют симметричным, его характеризует период T и амплитуда напряжения цикла σ_a . Цикл с $R_{\sigma} = 0$ называют отнулевым циклом нагружения, он близок по условиям нагружения к испытанию при растяжении, и результаты усталостных испытаний при отнулевом цикле нагружения сравнивают с результатами испытаний при растяжении.

Частота нагружения $f = 1/T$ – характеристика циклического нагружения, которая сильно влияет на фактор появления и роста циклической ползучести (рис. 3). Чем больше частота нагружения, тем меньше пластическая деформация (циклическая ползучесть), тем вид поверхности разрушения образца ближе к классическому виду усталостного излома (рис. 4).

В работе [7] приведено деление испытаний по частоте нагружения:

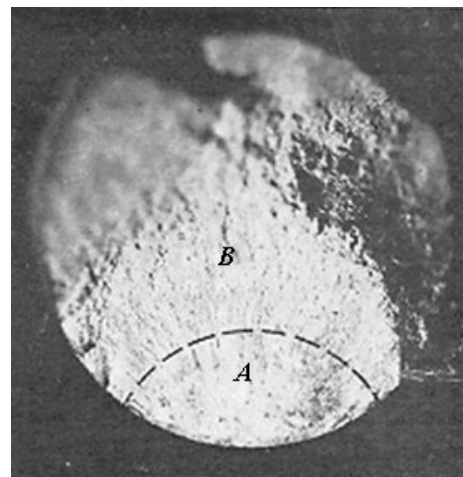


Рис. 4. Вид поверхности усталостного разрушения круглого образца, сделанного из поковки алюминиевого сплава АК6-Т1, при режиме испытания на растяжение: $\sigma_{\max} = 245$ МПа, $R = 0$, долговечность $N = 10^5$ циклов нагружения до разрушения (граница усталостной зоны A очерчена пунктиром, B – зона доллома)

Нагружение	Частота f , Гц
Квазистатическое	$f < 0,1$
Низкочастотное	$0,1 < f < 10$
Среднечастотное	$10 < f < 100$
Высокочастотное	$100 < f < 10000$
Область ультразвуковых частот	$f > 10000$

Результаты испытаний на усталость представляют в виде кривой усталости (кривой Вёлера) – зависимости максимального напряжения (деформации) или амплитуды цикла от циклической долговечности одинаковых образцов.

Результаты и обсуждение

При механических испытаниях напряжения возникают в образце от действия внешней нагрузки, они накладываются на остаточные напряжения, и уже от суммарных напряжений в образце происходят процессы, требующие исследования (рис. 5 и 6). Напряжения от действия внешней нагрузки получают расчетом по известным формулам. Действительные суммарные напряжения неизвестны, потому что, как правило, неизвестны взаимно уравновешенные внутренние напряжения. Результат взаимодействия напряжений зависит от многих факторов: неоднородности химического состава материала, строения материала, наличия в нем концентраторов напряжений, технологии изготовления образца и т. д. Необходимо признать, что разброс значений любой механической характеристики является объективным свойством. Таким

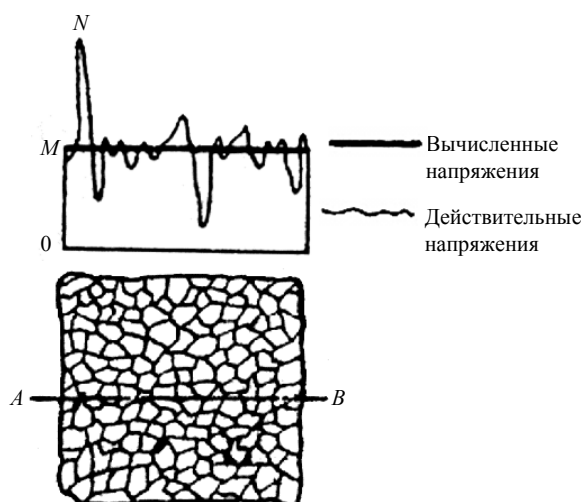


Рис. 5. Вычисленные (равны $0M$) и действительные напряжения N , действующие в металлическом материале по линии $A-B$ [15]

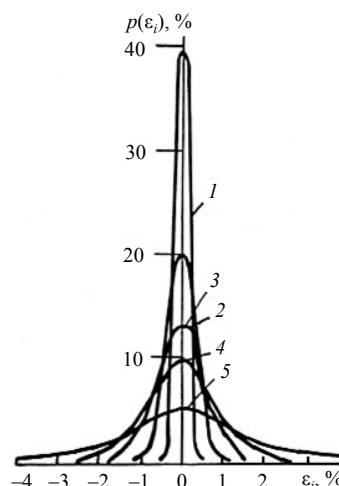


Рис. 6. Распределение остаточных деформаций по микрообъемам образца из стали 20 после циклического нагружения продолжительностью 10^3 (1), $5 \cdot 10^3$ (2), 10^4 (3), $8 \cdot 10^4$ (4), $1,85 \cdot 10^5$ циклов (5) [16, 17]

образом, количественное значение характеристики представляет собой случайную величину, которая может принимать различные числовые значения, заранее неизвестные и зависящие от случайных причин, которые не могут быть учтены. Наиболее полно случайные величины могут быть охарактеризованы с помощью функции распределения [18–25]. Пусть X – случайная величина. Функция распределения $F(x)$ этой случайной величины X есть вероятность того, что $X < x$. В теории вероятностей случайную величину рассматривают как заданную, если задана ее функция распределения, т. е. указаны значения, которые она может принимать, и отвечающие им вероятности появления.

Для количественного описания закономерностей рассеяния результатов механических испытаний используют известные в теории вероятностей распределения, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом. Наиболее широко применяемыми для этой цели непрерывными параметрическими распределениями являются нормальное распределение (распределение Гаусса), логарифмически нормальное распределение, распределение Вейбулла и распределение Пирсона.

Кривые усталости строят для одинаковых средних значений напряжения σ_m или деформации цикла ϵ_m , или коэффициента асимметрии цикла R (рис. 7) и вероятности разрушения P (обычно $P=50\%$ при использовании

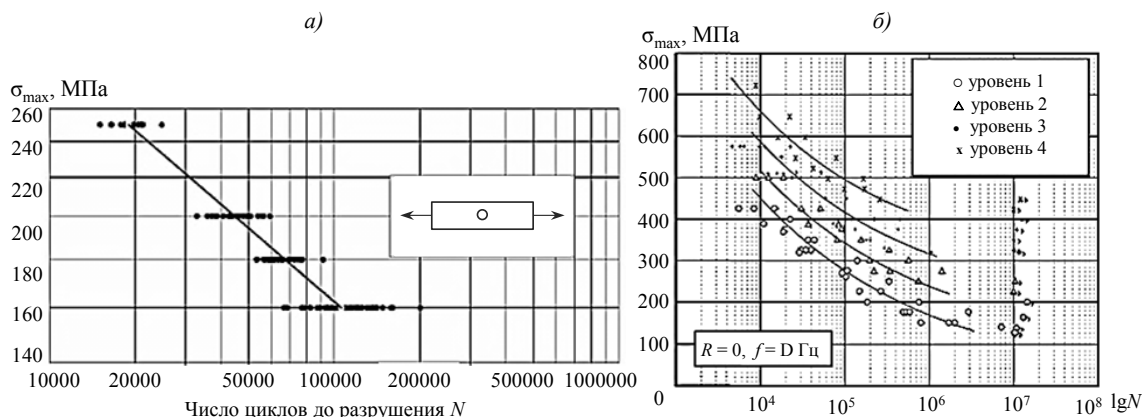


Рис. 7. Кривые усталости:

a – для сплава Д16ч.-АТ « $\lg \sigma_{\max} - \lg N$ » при $P=50\%$ и синусоидальном цикле ($R_\sigma=0, f=2$ Гц); b – пример построения в координатах « $\sigma_{\max} - \lg N$ » при $P=50\%$ и синусоидальном цикле ($R_\sigma=0, f=D$ Гц, где D – условное обозначение частоты) материала А с типом отверстия С и значениями σ_{\max} : 1, 2, 3, 4; знаком \rightarrow обозначены неразрушенные образцы

логарифмически нормального закона распределения). При испытании на каждом уровне напряжений n образцов, выборочные значения характеристик усталости определяют по следующим формулам:

– среднее значение логарифма долговечности $\overline{\lg N}$

$$\overline{\lg N} = \frac{\sum_{i=1}^n \lg N_i}{n}; \quad (1)$$

– дисперсия σ^2

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \overline{\lg N})^2}{n-1}; \quad (2)$$

– среднее квадратическое отклонение логарифма долговечности $S_{\lg N}$

$$S_{\lg N} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \overline{\lg N})^2}{n-1}} = \quad (3)$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \lg N_i \right)^2}{n-1}};$$

– доверительный интервал для среднего значения логарифма долговечности $\overline{\lg N}$

$$\overline{\lg N} - t_q \cdot S_{\lg N} / n^{1/2} < \overline{\lg N} < \overline{\lg N} + t_q \cdot S_{\lg N} / n^{1/2}; \quad (4)$$

– доверительный интервал для дисперсии σ^2

$$S_{\lg N}^2 (n-1) / \chi_{p_1}^2 \leq \sigma^2 < S_{\lg N}^2 (n-1) / \chi_{p_2}^2, \quad (5)$$

где t_q – критерий Стьюдента; χ_p^2 – α -квантиль распределения Пирсона, определяется по таблице для $p_1=1-\alpha/2$, $p_2=\alpha/2$.

Для получения надежных оценок долговечности необходимо испытывать большое количество образцов. Выборочные значения $\overline{\lg N}$ и $S_{\lg N}$ стремятся к значениям генеральных параметров при $n \rightarrow \infty$. На практике количество образцов ограничено. При одном значении напряжения или деформации испытывают обычно не более 20 образцов. Для выбора генеральной функции распределения разработаны качественные и количественные критерии оценки соответствия эмпирической функции распределения $F_n(\lg N)$ генеральной функции распределения $F(\lg N)$ [19–22, 24]. Логарифмически нормальный закон распределения качественно проверяют графически на вероятностной бумаге, соответствующей логарифмически нормальному закону распределения. Оценивают совпадение с линейной зависимостью между логарифмом вероятно-

сти разрушения и логарифмом числа циклов. Для этого совокупность n значений N или $\lg N$, что равнозначно, поскольку значение имеет только порядковый номер в вариационном ряду, располагают в вариационный ряд

$$\lg N_1 \leq \lg N_2 \leq \dots \leq \lg N_{i-1} \leq \lg N_i \leq \lg N_{i+1} \leq \dots \leq \lg N_n. \quad (6)$$

Члены этого ряда называются порядковыми статистиками. По данным выборки можно построить эмпирическую функцию распределения:

$$F_n(\lg N) = \begin{cases} 0 & \text{для } \lg N \leq \lg N_1, \\ i/n & \text{для } \lg N_{i-1} \leq \lg N \leq \lg N_i, \\ 1 & \text{для } \lg N \geq \lg N_n. \end{cases} \quad (7)$$

Эмпирическая функция распределения $F_n(\lg N)$ служит выборочной оценкой генеральной функции распределения $F(\lg N)$ и может рассматриваться как ее приближение.

В формуле (7) при $n < 50$ вместо i/n берутся значения $i/(n+1)$ и $(i-1/2)/n$ при $n < 20$ [23].

Количественные критерии соответствия эмпирической функции распределения $F_n(\lg N)$ генеральной функции распределения $F(\lg N)$ целесообразно использовать при объемах выборки не менее 50. Используют следующие критерии: Смирнова (ω^2), Андерсона–Дарлингга (A^2), согласия (или критерий Пирсона χ^2), Шапиро–Уилка (W-критерий, который можно использовать и при ограниченных объемах испытаний ($n \leq 50$)) [22].

Другой характеристикой усталостных испытаний является петля механического гистерезиса (рис. 3 и рис. 8–10), которая сопровождается каждый цикл нагружения и демонстрирует поглощение образцом энергии за цикл нагружения. Рассмотрим симметричный цикл нагружения (рис. 8), когда петля замкнута – оба вида нагружения («мягкое» и «жесткое») производят в материале образца знакопеременное пластическое деформирование с размахом, равным ширине петли $\Delta \epsilon_p$. Если этот основной повреждающий материал фактор – знакопеременная пластическая деформация – одинаков (рис. 8) и с возрастанием количества циклов не изменяется, то «мягкое» и «жесткое» нагружения эквивалентны по степени воздействия на циклически стабильный материал образца.

На практике и «мягкое» ($\Delta \sigma = 2\sigma_a = \text{const}$) и «жесткое» ($\Delta \epsilon = 2\epsilon_a = \text{const}$) нагружение с увеличением количества циклов вызывает изменение ширины и формы петли механического гистерезиса (рис. 9 и 10). При «мягком» нагружении упругопластическая (полная) деформация $\Delta \epsilon$ изменяется, а при «жестком» нагружении этого не происходит. При «жестком» нагружении пластическая

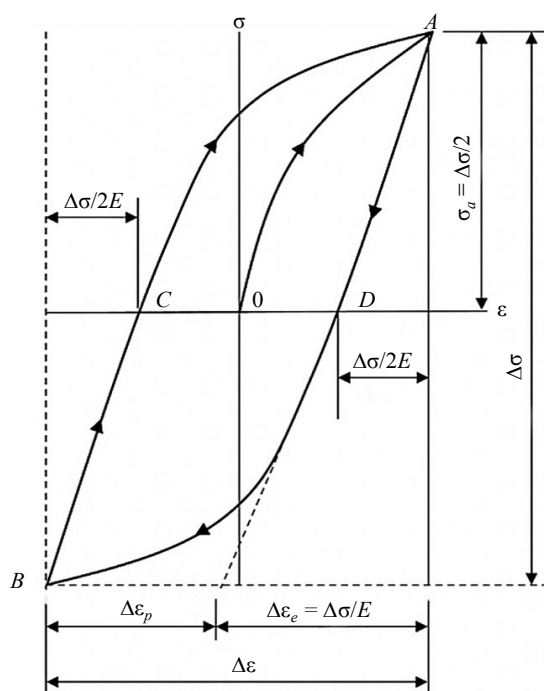


Рис. 8. Петля и параметры упругопластического гистерезиса при симметричном циклическом нагружении

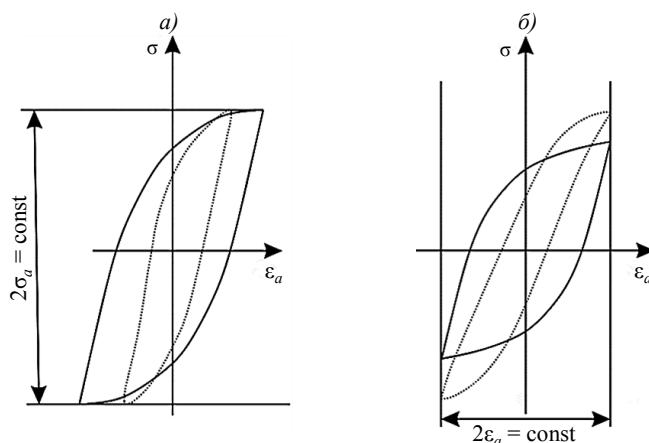


Рис. 9. Изменение петли гистерезиса (от обозначенной сплошной линией до обозначенной пунктирной линией) на стадии упрочнения материала образца при «мягком» (а) и «жестком» (б) усталостном нагружении

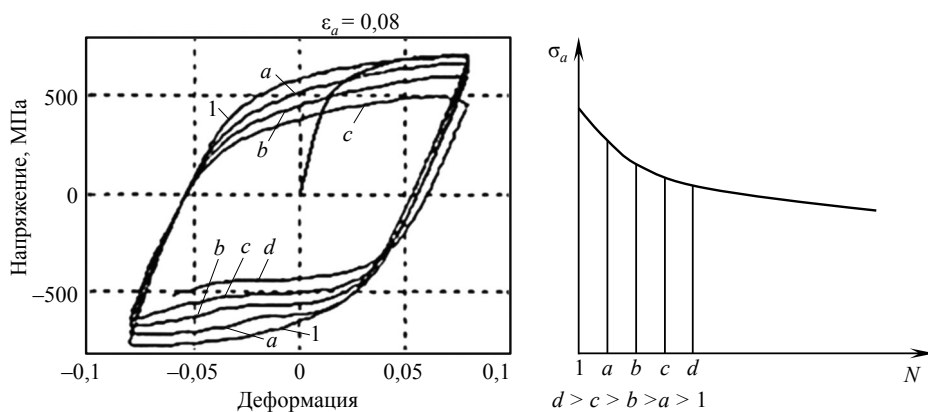


Рис. 10. Петля гистерезиса при «жестком» цикле усталостного испытания на стадии разупрочнения

и упругая деформации могут только переходить одна в другую, тогда как при «мягком» нагружении к процессу перехода прибавляется процесс циклической ползучести. «Жесткое» нагружение обладает меньшим количеством воздействующих на материал параметров, и благодаря этому при испытании получают меньший разброс результатов.

Рассмотрим «жесткое» нагружение подробнее (рис. 8; рис. 9, б; рис. 10 и 11) [26–30]. Деформация $\Delta\varepsilon/2=\varepsilon_a$ (рис. 8, $\Delta\varepsilon=2\varepsilon_a=\text{const}$) вызовет появление напряжения σ_a (точка А). Дальнейшая разгрузка до точки D позволит получить часть диаграммы циклического деформирования, аналогичную диаграмме при однократном растяжении до заданной величины общей деформации. Эту часть циклического нагружения называют исходным (нулевым) полуциклом. Полуцикл от точки А до точки В нумеруют первым полуциклом, а от точки В до точки А – вторым. Кривые в первом, втором и последующих полуциклах, с началом в точке начала разгрузки, называют диаграммами (кривыми) циклического деформирования. На рис. 11 приведены схемы построения кривых циклического деформирования от исходного полуцикла (обозначен цифрой 0, $k=0$) до полуцикла k при «жестком» ($\varepsilon_a=\text{const}$) и «мягком» ($\sigma_a=\text{const}$) нагружении.

В исходном полуцикле при «жестком» нагружении до деформации $\bar{\varepsilon}_a$ максимальное напряжение равно $\bar{\sigma}^{(0)}$, предел текучести –

$\bar{\sigma}_T$ при упругопластической деформации $\bar{\varepsilon}_T$. Кривые циклического деформирования строят в координатах $\bar{S}-\bar{\varepsilon}$ с началом координат в точках начала разгрузки. В первом полуцикле разгрузка идет по прямой линии, которая продолжается при сжатии до предела текучести $\bar{S}_T^{(1)}$. Далее в образце возникает пластическая деформация сжатия. В первом полуцикле кривая циклического деформирования имеет следующие характеристики: $\bar{S}_{\text{max}}^{(1)}$ – максимальное напряжение, $\bar{S}_T^{(1)}$ – предел текучести, $2\bar{\varepsilon}_{pa}=\bar{\delta}^{(1)}$ – пластическая деформация, равная ширине петли гистерезиса $\bar{\delta}^{(1)}$. В k -м полуцикле получим: $\bar{S}_{\text{max}}^{(k)}$ – максимальное напряжение, $\bar{S}_T^{(k)}$ – предел текучести, $2\bar{\varepsilon}_{pa}=\bar{\delta}^{(k)}$ – пластическая деформация, равная ширине петли гистерезиса $\bar{\delta}^{(k)}$. Если в процессе увеличения количества циклов у кривых циклического деформирования уменьшается значение $\bar{S}_{\text{max}}^{(k)}$, происходит разупрочнение материала.

При «мягком» нагружении с таким же значением $\bar{\sigma}^{(0)}$, как при «жестком» нагружении, получим кривую циклического деформирования с постоянной величиной $\bar{S}_{\text{max}}^{(k)}=2\bar{\sigma}^{(0)}$. С каждым последующим циклом нагружения материал образца накапливает пластическую деформацию за счет деформации циклической ползучести при незамкнутой петле гистерезиса. Ширина петли может уменьшаться при упрочнении материала образца.

Ширина и форма петли гистерезиса, кривые циклического деформирования характеризуют

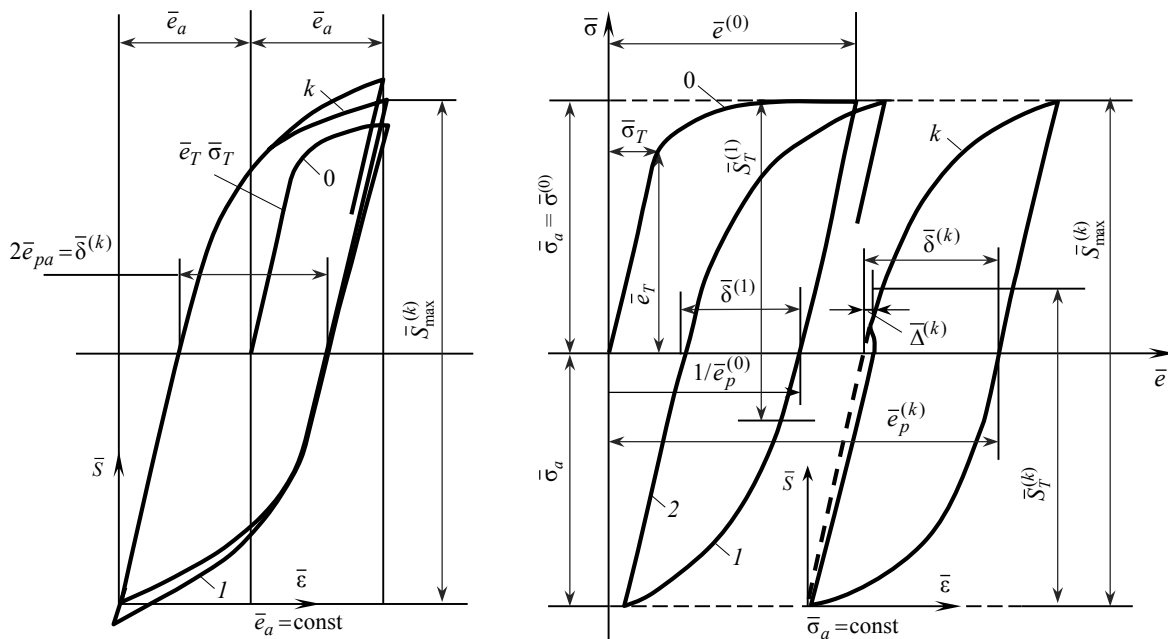


Рис. 11. Схемы построения диаграммы циклического упругопластического деформирования при «жестком» и «мягком» нагружении (1, 2 – номер полуцикла) [27]

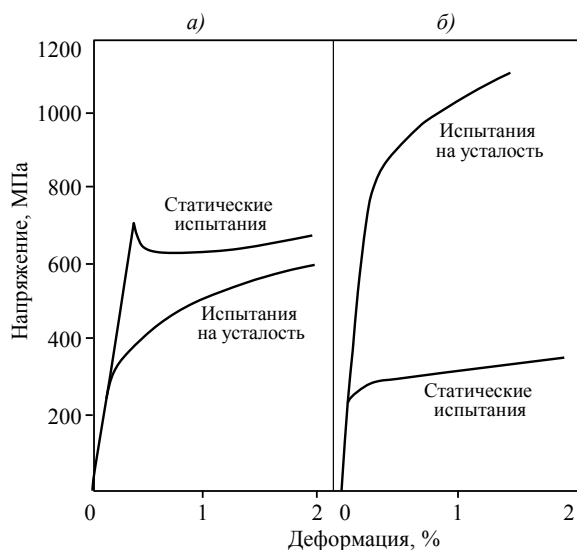


Рис. 12. Кривые статического и циклического деформирования углеродистой стали с 0,45% С (а) и стали, легированной хромом и никелем (б) [9]

состояние материала на каждом цикле усталостного нагружения. Изменение характеристик петли гистерезиса и кривых циклического деформирования демонстрирует способность материала сопротивляться циклическому нагружению. Если с возрастанием количества циклов характеристики не изменяются и устанавливается стабильное состояние материала, материал считают циклически стабильным. При сужении петли гистерезиса (рис. 9) и расположении кривой циклического деформирования выше диаграммы статического деформирования (рис. 12, б) – материал циклически упрочняющийся. Расширение петли при «мягком» нагружении, снижение значе-

ний σ_a и модуля упругости E (характеризуется углом наклона начального линейного участка диаграммы деформирования в каждом цикле нагружения) при «жестком» нагружении (рис. 10), расположение кривой циклического деформирования ниже диаграммы статического деформирования (рис. 12, а) характеризуют циклически разупрочняющийся материал. Существуют и циклически нестабильные материалы, у которых циклическое разупрочнение, упрочнение и стабилизация существуют, взаимодействуя и сменяя друг друга, как упругая и пластическая деформации при «жестком» нагружении.

Схема полной кривой усталости в диапазоне напряжений от предела прочности при растяжении σ_b до предела выносливости σ_R представлена на рис. 13 [7–9, 31, 32]. Схема демонстрирует, что на уровне физических и структурных явлений процесс усталости единый. Циклическое поведение конструкционного материала зависит от его статических свойств и структурного состояния и может быть определено по кривым однократного и циклического деформирования с учетом изменения петли пластического гистерезиса (рис. 14). Характерные точки на кривой циклического деформирования могут служить характеристиками усталостной долговечности аналогично характеристикам на диаграмме растяжения [33–35].

Следует отметить экспериментально обнаруженные многими исследователями разрывы кривых усталости [9]. Разрыв представляет собой горизонтальную ступеньку на кривой усталости (линия « σ_b -точка А» на рис. 13) или наличие двух параллельных кривых в определенном диапазоне напряжений. Главными

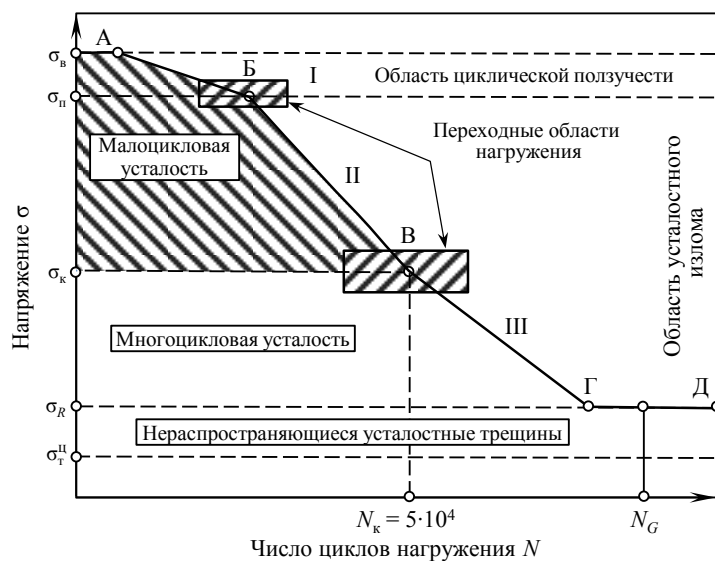


Рис. 13. Схема полной кривой механической усталости (σ_T^H – циклический предел текучести) [9]

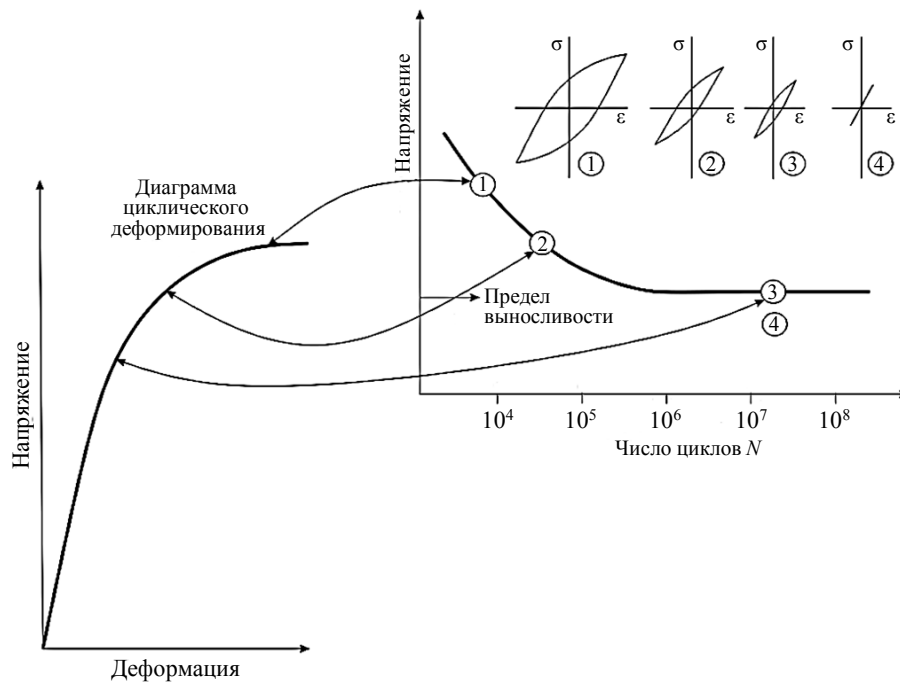


Рис. 14. Схема, демонстрирующая связь кривой циклического деформирования с кривой усталости и изменением параметров петли механического гистерезиса напряжения

причинами появления разрывов являются структурное состояние материала (особенно поверхностных слоев) и смена плосконапряженного состояния при малоцикловой усталости на плоскодеформированное состояние при многоцикловой усталости.

Область циклической ползучести I ($\sigma_{п} \leq \sigma \leq \sigma_{в}$) – область высоких напряжений, при которых возрастающее число циклов нагружения вызывает накопление пластической деформации. Петля механического гистерезиса остается открытой до момента разрушения образца (рис. 3). Разрушение металлических материалов, обладающих пластикой, носит квазистатический характер с образованием шейки. Значения предела выносливости материала близки к значению его предела прочности. Циклические нагружения, при которых разрушение происходит в диапазоне до 10^3 циклов нагружения, называют повторно-статическими испытаниями. Прогнозирование ресурса работоспособности материала в этом диапазоне можно проводить на основе результатов статических испытаний [36, 37]. Зависимость « $\lg \sigma_{\max} - \lg N$ » в диапазоне от 1 до 10^3 циклов нагружения близка к линейной зависимости [28–32].

Область малоцикловой усталости II ($\sigma_{к} \leq \sigma \leq \sigma_{п}$) и область многоцикловой усталости III ($\sigma_{R} \leq \sigma \leq \sigma_{к}$) занимают основную часть полной кривой усталости. Испытания на малоцикловую и многоцикловую усталость стандартизованы [38–49].

Малоцикловая усталость (МЦУ) – это усталость материала, при которой повреждение происходит при упругопластическом деформировании в микрообъеме. Максимальная долговечность до разрушения составляет условное число $N_{к} = 5 \cdot 10^4$ циклов. Наиболее значимым фактором при малоцикловой усталости является размах пластической деформации за цикл. Знакопеременное пластическое деформирование характерно для зон концентрации напряжений и деформаций. Исследование малоцикловой усталости металлических материалов обычно проводят с использованием «жесткого» нагружения с детальным изучением изменений петли гистерезиса в процессе испытания. При таком нагружении процесс накопления повреждений происходит за счет действия реверсивных деформаций, в которые циклическая ползучесть вносит незначительный вклад. В результате возникают малоцикловые усталостные повреждения и разрушения. В случае «мягкого» нагружения циклическая ползучесть и накопление преимущественно односторонних пластических деформаций приводят к малоцикловому квазистатическому разрушению.

При «жестком» циклическом нагружении входными параметрами являются: форма цикла (форма колебаний деформации), частота цикла, коэффициент асимметрии деформации, максимальная деформация, амплитуда деформации. В результате испытаний получают

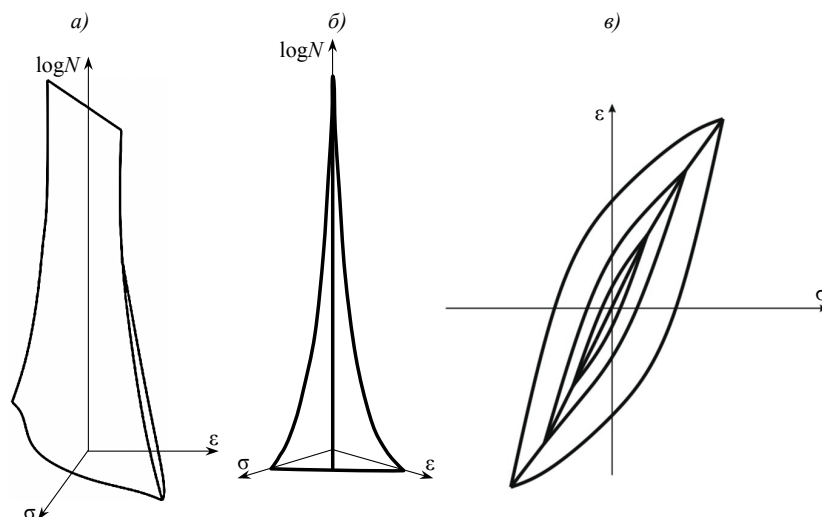


Рис. 15. Трехмерная модель представления результатов испытания на усталость с «жестким» циклическим нагружением:

a – вид в изометрии; *б* – вид сбоку; *в* – вид сверху

зависимость числа циклов до появления магистральной трещины и (или) разрушения от величины максимальной деформации или ее амплитуды, но для удобства трактовки результатов их преобразовывают в кривую зависимости максимальной деформации или ее амплитуды от количества циклов. Результаты могут быть представлены и в виде изменения петли гистерезиса. При «жестком» цикле можем наблюдать картину снижения несущей способности образца (падение напряжения), представленную на рис. 10. Процесс «жесткого» циклического деформирования наглядно демонстрируется в трехмерной системе координат « $\lg N$ –гистерезисная петля σ – ϵ » (рис. 15) [50–52]. Для этого на диаграмму отображают гистерезисную петлю в параллельных плоскостях σ – ϵ при фиксированных значениях числа циклов N .

Построенная поверхность представляет способность материала сопротивляться усталостному нагружению на каждом цикле, позволяет выделять участки стабильного состояния, упрочнения и разупрочнения. Таким образом, от плоских кривых переходят к трехмерным поверхностям, позволяющим получать более полную информацию о зависимости изменения напряжения и/или деформации от частоты и/или скорости нагружения. Такое представление результатов визуально более наглядно, чем плоское изображение, и

легко осуществимо при помощи современных технологий 3D-моделирования (рис. 15).

Заключение

Представленная часть обзора по исследованию усталости металлических материалов является лишь введением в этот сложный и актуальный раздел механики материалов. Показано, что отличительной чертой малоциклового усталости является влияние на долговечность размера и формы петли механического гистерезиса. Зарождение магистральной трещины происходит на поверхности и в приповерхностных слоях образца.

Во второй части обзора будут представлены особенности испытаний на многоцикловую усталость, анализ уравнения Баскина–Мэнсона–Коффина, связывающего деформационные параметры петли гистерезиса с числом циклов до зарождения магистральной усталостной трещины, а также будут даны деформационные кривые усталости с использованием постоянных величин, полученных для сталей, никелевых, титановых, алюминиевых сплавов и чугунов. Проведено сравнение методик испытаний и обработки получаемых результатов при «жестком» нагружении. В качестве универсального метода для исследования и оценки сопротивления материалов усталости предложено программное «жесткое» нагружение с пошаговым увеличением деформации образца.

Библиографический список

1. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов: в 2 ч. М.: Машиностроение, 1974. Ч. 2: Механические испытания. Конструкционная прочность. 368 с.
2. Трошенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.

3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Терентьев В.Ф., Кораблева С.А. Усталость металлов. М.: Наука, 2015. 484 с.
8. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов. М.: ИМЕТ РАН–ЦИАМ, 2013. 515 с.
9. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2003. 254 с.
10. Новиков И.И., Ермишкин В.А. Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. С. 115–169.
11. 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.
12. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №10 (58). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-11-11.
13. 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: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №2 (62). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-12-12.
14. 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.
15. Гоц А.Н. Расчеты на прочность при переменных напряжениях. Владимир: ВлГУ, 2012. 138 с.
16. Трощенко В.Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 1. Неупругость, методы и результаты исследования // Проблемы прочности. 2005. №4. С. 5–32.
17. 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.
18. Вейбулл В. Усталостные испытания и анализ их результатов. М.: Машиностроение, 1964. 275 с.
19. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний: справочник. М.: Металлургия, 1978. 304 с.
20. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М.: Машиностроение, 2005. 400 с.
21. Ерасов В.С. Физико-механические характеристики как основные интегральные показатели качества авиационных конструкционных материалов: метод. пособие. М.: ВИАМ, 2011. 16 с.
22. Агамиров Л.В. Методы статистического анализа механических испытаний: справочник. М.: Интернет Инжиниринг, 2004. 128 с.
23. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов: в 2 ч. М.: Машиностроение, 1974. Ч. 1: Деформация и разрушение. С. 374–414.
24. 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.
25. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: справочное пособие. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
26. Захарченко К.В. Метод исследования закономерностей периодического деформирования и связанных с ними диссипативных процессов при усталости авиационных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: НГТУ, 2018. 185 с.
27. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
28. 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.

29. Махутов Н.А. Малоцикловая усталость // Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. М.: Машиностроение, 2010. Т. II-I: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. С. 217–285.
30. Махутов Н.А., Москвитин Г.В. Влияние условий нагружения на накопление повреждений и разрушение // Машиностроение: энциклопедия: в 40 т. М.: Машиностроение, 2010. Т. II-I: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов. С. 220–221.
31. Вахромеев А.М. Определение циклической долговечности материалов и конструкций транспортных средств: метод. указания. М.: МАДИ, 2015. 64 с.
32. Штремель М.А. О единстве в многообразных процессах усталости // Деформация и разрушение материалов. 2011. №6. С. 1–12.
33. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А. Усталость и циклическая неупругость аустенитной стали после длительной эксплуатации при различных режимах нагружения // Проблемы прочности. 2012. №5. С. 5–14.
34. Трощенко 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.
35. Трощенко В.Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 3. Деформационные и энергетические критерии // Проблемы прочности. 2006. №1. С. 5–31.
36. 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.
37. 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: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №9 (69). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104.
38. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Стандартиформ, 2005. 50 с.
39. ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. М.: Стандартиформ, 1988. 132 с.
40. ASTM E1823-13. Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Practice Testing. American Society for Testing and Materials, 2013. 25 p.
41. 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.
42. ASTM E468-18. Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Tests Results for Metallic Materials. American Society for Testing and Materials, 2019. 6 p.
43. ASTM E606/E606M-19. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing. American Society for Testing and Materials, 2018. 16 p.
44. ISO 12106:2017(en). Metallic Materials – Fatigue Testing – Axial-Strain-Controlled Method. ISO: Geneva, 2017. 38 p.
45. Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-12). Atlantic City: Federal Aviation Administration, 2017. 2520 p.
46. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов: авиационный справочник. М.: ОАК; ЦАГИ, 2013. 302 с.
47. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
48. Коновалов В.В. Методология аттестации конструкционных металлических материалов планера самолета // Труды ЦАГИ. 2013. Вып. 2725. С. 21–80.
49. Терентьев В.Ф. Полная кривая усталости металлов и сплавов // Технология металлов. 2004. №6. С. 12–16.
50. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Луценко А.Н., Терентьев В.Ф., Слизов А.К. Построение диаграмм деформирования в трехмерном пространстве σ – ε – t // Авиационные материалы и технологии. 2017. №1 (46). С. 61–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-61-68.
51. 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.
52. 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.