ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59115.5— 2021

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Расчетные характеристики циклической и длительной циклической прочности конструкционных материалов

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля» (АО «НИКИЭТ»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 322 «Атомная техника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 октября 2021 г. № 1169-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

5 Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии не несет ответственности за патентную чистоту настоящего стандарта. Патентообладатель может заявить о своих правах и направить в Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии аргументированное предложение о внесении в настоящий стандарт поправки для указания информации о наличии в нем объектов патентного права и патентообладателе

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2021

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения и обозначения 2
4 Общие положения 3
5 Требования к испытаниям конструкционных материалов на усталость 3
5.1 Общие положения 3
5.2 Циклическая прочность в малоцикловой области (малоцикловая усталость) 5
5.3 Циклическая прочность в многоцикловой области (многоцикловая усталость) 6
5.4 Длительная циклическая прочность 8
5.5 Циклическая прочность сварных соединений и металла с наплавкой 8
5.6 Циклическая прочность основных материалов сварных соединений (металла с наплавкой) в коррозионных средах 9
5.7 Влияние облучения на циклическую прочность основных материалов и сварных соединений (металла с наплавкой) 13
Приложение А (рекомендуемое) Расчетные кривые усталости 16
Библиография 24

Введение

Настоящий стандарт взаимосвязан с другими стандартами, входящими в комплекс стандартов, регламентирующих обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Расчетные характеристики циклической и длительной циклической прочности конструкционных материалов

Rules for strength assessment of equipment and pipelines of nuclear power installations. Design characteristics of cyclic and long-term strength of structural materials

Дата введения — 2022—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт предназначен для применения при проведении расчетов по обоснованию прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, на которые распространяется действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [1].

1.2 Настоящий стандарт устанавливает расчетные кривые усталости, используемые при проведении расчетов на прочность оборудования и трубопроводов, указанных в 1.1, а также устанавливает требования к испытаниям на усталость основных конструкционных материалов (далее — материалов), их сварных соединений и металла с наплавкой.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 25.502 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость

ГОСТ 25.505 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении

ГОСТ 23207 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения

ГОСТ Р 8.932 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к методикам (методам) измерений в области использования атомной энергии. Основные положения

ГОСТ Р 59115.1 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Термины и определения

ГОСТ Р 59115.2—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Модуль упругости, температурный коэффициент линейного расширения, коэффициент Пуассона, модуль сдвига

ГОСТ Р 59115.3—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Кратковременные механические свойства конструкционных материалов

ГОСТ Р 59115.4 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Длительные механические свойства конструкционных материалов

ГОСТ Р 59115.9 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам

Издание официальное

ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины, определения и обозначения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 23207 и ГОСТ Р 59115.1, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **(основные) конструкционные материалы:** Материалы в виде полуфабрикатов из сталей и сплавов, применяемые при изготовлении, монтаже и ремонте оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

3.1.2 **полуфабрикат:** Заготовка (лист, труба, поковка, сортовой прокат, отливка, заготовка крепежных деталей), поставляемая для изготовления деталей или сборочных единиц оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

3.1.3 **расчетная кривая усталости:** Характеристика конструкционного материала в координатах «допускаемая амплитуда условных упругих напряжений — число циклов нагружения», используемая в расчетах на циклическую прочность.

3.2 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

e_a — амплитуда упругопластической продольной деформации (амплитуда полной деформации), %;

e_{ap} — амплитуда пластической продольной деформации, %;

e_{apc} — амплитуда пластической поперечной деформации, %;

e_{ae} — амплитуда упругой продольной деформации, %;

e_{aec} — амплитуда упругой поперечной деформации, %;

e_{ac} — амплитуда упругопластической поперечной деформации, %;

e_{aF} — амплитуда упругопластической продольной деформации (амплитуда полной деформации) облученного образца, %;

e_0 — деформация нулевого полуцикла нагружения, %;

μ_p — коэффициент Пуассона для пластической деформации;

μ_e — коэффициент Пуассона для упругой деформации;

δ_1 — ширина петли гистерезиса в первом полуцикле нагружения;

σ_0 — напряжение нулевого полуцикла нагружения, МПа;

σ_a — напряжение стабилизированного цикла или числа циклов, равного 0,5 долговечности, МПа,

σ_{max} — максимальное напряжение цикла нагружения, МПа;

σ_{min} — минимальное напряжение цикла нагружения, МПа;

$[\sigma_{aF}]$ — допускаемая амплитуда условного упругого напряжения, МПа;

φ_s — коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения и металла с наплавкой;

$\varphi_к$ — коэффициент коррозионного снижения циклической прочности основного металла;

$\varphi_{кs}$ — коэффициент коррозионного снижения циклической прочности сварного соединения материала (металла с наплавкой);

$\bar{\varphi}_{\pi}$ — минимальное значение коэффициента коррозионного снижения циклической прочности основного металла;

$\bar{\varphi}_{\pi s}$ — минимальное значение коэффициента коррозионного снижения циклической прочности сварного соединения материала (металла с наплавкой);

φ_F — коэффициент снижения циклической прочности основного металла в результате нейтронного облучения;

φ_{Fs} — коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения материала (металла с наплавкой) в результате нейтронного облучения,

r — коэффициент асимметрии цикла нагружения;

r_σ — коэффициент асимметрии цикла нагружения по напряжению;

r_e — коэффициент асимметрии цикла нагружения по деформации;

$\Psi\sigma$ — коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла напряжений (деформаций);

$E^T(E)$ — модуль упругости при температуре T, МПа;

N — число циклов нагружения образца при испытаниях;

N_0 — заданное число циклов (база испытаний);

N_f — число циклов нагружения образца до разрушения;

N_c — число циклов нагружения образца до обнаружения трещины;

R_m^T — минимальное значение временного сопротивления при температуре T, МПа;

$R_{p0,2}^T$ — минимальное значение условного предела текучести при остаточной деформации 0,2 % при температуре T, МПа;

R_{-1} — предел выносливости при симметричном цикле осевого растяжения-сжатия, МПа;

R_{pe} — предел пропорциональности в нулевом полуцикле, МПа;

Z^T — минимальное значение относительного сужения при температуре T.

4 Общие положения

4.1 Подразделение марок конструкционных материалов по группам (классам) приведено в ГОСТ Р 59115.2—2021 (приложение А).

4.2 Расчетные кривые усталости материалов приведены в приложении А.

Для конкретного материала, температуры и длительности нагружения расчетные кривые усталости получают в порядке, установленном в ГОСТ Р 59115.9.

4.3 Для экспериментального определения расчетных кривых усталости, включая случаи отсутствия или недостаточности расчетных данных, в том числе приведенных в приложении А, а также при необходимости определения влияния на них эксплуатационных факторов (рабочей среды, температуры, нейтронного облучения) в течение срока службы следует руководствоваться положениями раздела 5.

5 Требования к испытаниям конструкционных материалов на усталость

5.1 Общие положения

5.1.1 Испытания на усталость материалов проводят для получения расчетных характеристик, используемых при проведении расчетов на циклическую прочность (расчетных кривых усталости).

5.1.2 Основными характеристиками, подлежащими определению по результатам испытания материалов и их сварных соединений на усталость в малоцикловой и многоцикловой областях, являются:

- диаграмма статического и циклического деформирования до достижения значений деформаций (по оси абсцисс) не менее 3 % и константы уравнений кривых деформирования при их степенной аппроксимации;

- кривые усталости при нагружении с заданными значениями деформаций и константы уравнений кривых циклической прочности при их степенной аппроксимации;

- кривые усталости при нагружении с заданными усилиями и константы уравнений кривых циклической прочности при их степенной аппроксимации;

- предел выносливости материала при заданном числе циклов при симметричном нагружении по напряжениям;

- коэффициенты снижения циклической прочности сварного соединения и металла с наплавкой φ_s;

- кривые усталости при длительном нагружении материалов и их сварных соединений;

- коэффициенты снижения циклической прочности материалов и их сварных соединений в результате влияния нейтронного облучения,

- коэффициенты влияния среды на циклическую прочность материалов и их сварных соединений.

5.1.3 При проведении испытаний на усталость следует применять аттестованные в соответствии с ГОСТ Р 8.932 методики измерений при испытаниях, включающие или основанные на процедурах проведения испытаний и обработки их результатов, установленных в документах по стандартизации на поставку материалов, а также в настоящем стандарте.

5.1.4 Требования к организациям (испытательным лабораториям), проводящим испытания по определению характеристик материалов, установлены в ГОСТ Р 59115.3—2021 (пункт 5.1.3).

5.1.5 Требования к средствам измерения и испытательному оборудованию, используемым при испытаниях, установлены в ГОСТ Р 59115.3—2021 (пункт 5.1.3), ГОСТ 25.502 и ГОСТ 25.505.

Оборудование для нагрева образцов должно обеспечивать нагрев рабочей части образцов типов II и IV (для образцов типов I и III участок с радиусом R) по ГОСТ 25.502 с перепадом температур по длине и диаметру (толщине) не более 5 °С на 10 мм.

5.1.6 При испытаниях должны быть удовлетворены требования ГОСТ 25.502 и ГОСТ 25.505 к форме и размерам образцов, их изготовлению, включая чистоту поверхности.

Форму и размеры образцов для испытаний выбирают с учетом формы и размеров сечений заготовок для компонентов оборудования и трубопроводов, а также целей испытаний. Для стержневых и листовых компонентов оборудования с толщиной стенки свыше 20 мм используют преимущественно цилиндрические образцы, а для тонкостенных листовых элементов оборудования с толщиной стенки до 10 мм — плоские образцы.

5.1.7 Деформацию рабочей части образцов типов II и IV по ГОСТ 25.502 измеряют продольными деформометрами, при этом расстояние от опор деформометра до переходной части должно быть не менее 2 мм. При испытаниях образцов типов I и III по ГОСТ 25.502 применяют поперечные деформометры.

Определение продольной деформации следует производить по формуле $\varepsilon_a = \frac{\sigma_{apa}}{\mu_p} + \frac{\sigma_{aac}}{\mu_e}$ или $\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_{ac}}{\mu_p} + \frac{\sigma_{ae}(\mu_p - \mu_e)}{\mu_p}$.

Значения μ_p и μ_e определяют в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59115.2. В расчетах на прочность конструктивных элементов, изготовленных из материалов, указанных в ГОСТ Р 59115.2—2021 (таблица А.1, пункты 1—8), допускается принимать значения $\mu_p = 0{,}5$, $\mu_e = 0{,}3$.

5.1.8 При проведении испытаний на усталость при повышенных температурах погрешность поддержания и измерения заданной температуры рабочей части образца не должна превышать ± 5 °С в диапазоне температур от 50 °С до 600 °С.

5.1.9 Образцы для проведения испытания (заготовки для образцов) должны быть вырезаны из материалов:

- соответствующих требованиям документов по стандартизации на поставку конкретных материалов, проектной конструкторской и технологической документации, что должно быть подтверждено сертификатами организаций — изготовителей материалов, и прошедших входной контроль качества;

- термически обработанных в соответствии с документами по стандартизации на поставляемые материалы и/или с требованиями проектной конструкторской документации.

5.1.10 Отбор проб, требования к образцам и ориентации в исследуемом полуфабрикате, порядок проведения испытаний, в том числе облучения образцов, и обработка результатов для определения характеристик циклической и длительной циклической прочности должны соответствовать методикам измерений при испытаниях.

5.1.11 Для материала, испытываемого на усталость, должны быть получены кратковременные механические характеристики в соответствии с ГОСТ Р 59115.3 и характеристики длительной прочности и

длительной пластичности при соответствующих температурах испытаний и длительности нагружения — в соответствии с ГОСТ Р 59115.4.

5.2 Циклическая прочность в малоцикловой области (малоцикловая усталость)

5.2.1 Испытания на малоцикловую усталость материалов следует проводить по принятой методике измерений при испытаниях, включающей процедуру в соответствии с ГОСТ 25.502 и соответствующей требованиям 5.1.3.

5.2.2 Малоцикловое нагружение образцов должно быть проведено преимущественно в режиме осевого растяжения-сжатия с заданными амплитудами деформаций. Допускается проведение испытаний при изгибе или кручении.

5.2.3 Для материалов, склонных к циклическому разупрочнению (с отношением предела текучести к временному сопротивлению свыше 0,7), наряду с испытаниями, указанными в 5.2.2, следует проводить испытания с заданной амплитудой напряжений (усилий).

5.2.4 Испытания на малоцикловую усталость на воздухе следует проводить:

- при осевом растяжении-сжатии (основной вид нагружения);
- амплитудах напряжений выше предела текучести и соответствующих деформациях;
- симметричном цикле по контролируемому параметру (деформация или напряжение);
- числе циклов нагружения от 10 до $5 \cdot 10^4$ (не менее);
- частоте нагружения (до 1 Гц), исключающей саморазогрев образцов более чем на 30 °С от заданной температуры.

5.2.5 Характеристики сопротивления малоцикловой усталости, указанные в 5.1.2, должны быть определены по результатам испытаний серии образцов в количестве (при каждой температуре испытания):

- не менее трех — для определения диаграммы деформирования;
- не менее 10 — для определения кривых усталости по образованию трещин длиной от 0,5 до 2,0 мм при симметричном цикле деформаций или напряжений.

5.2.6 При склонности образцов типа II и IV по ГОСТ 25.502 к потере устойчивости допускается сокращение длины рабочей части l образцов типа II до $2d$ (d — диаметр рабочей части) и типа IV до $2\sqrt{bh}$ (где b — высота; h — толщина рабочей части плоского образца).

5.2.7 Порядок проведения испытаний на малоцикловую усталость:

- проведение внешнего осмотра образцов и измерение размеров сечения рабочей части образцов с погрешностью не более 0,5 % номинального размера;
- проведение статических испытаний для определения механических свойств;
- проведение нулевого полуцикла нагружения образцов — проводится при растяжении;
- проведение испытаний первого образца при амплитуде деформаций 1 % (при нагружении с заданными деформациями) и деформации нулевого полуцикла 0,6 % (при нагружении с заданными нагрузками);
- проведение испытаний последующих образцов при амплитудах деформации или деформациях нулевого полуцикла, обеспечивающих приблизительно равномерное распределение (в логарифмической шкале) получаемых долговечностей в заданном диапазоне чисел циклов согласно 5.2.4 (условия испытаний выбираются в зависимости от результата испытания первого образца).

В процессе испытаний проводится запись нагрузок и деформаций в нулевом полуцикле и в циклах 10^p, $2 \cdot 10^p$, $3 \cdot 10^p$, $5 \cdot 10^p$, где $p = 0, 1, 2, 3, 4$.

При проведении испытания с целью определения долговечности регистрируют число циклов, соответствующее моменту образования трещины.

5.2.8 По результатам испытаний серии образцов составляют сводный протокол, включающий исходные данные (марка материала, термообработка, тип заготовки, место и ориентация вырезки образцов, форма, размеры и маркировка образца, тип машины, условия испытаний) о серии образцов, данные об амплитудах деформаций, напряжений, долговечности до образования трещин и о константах уравнений диаграмм деформирования.

5.2.9 Результаты испытаний при нагружении с заданными амплитудами деформаций каждого образца серии представляются графически в двойных логарифмических координатах «lg e_a – lg N», «lg e_{ap} – lg N», «lg e_{ae} – lg N».

Указанные выше амплитуды деформаций принимаются для стабилизированного цикла или числа циклов, равного 0,5 N.

5.2.10 Результаты испытаний при нагружении с заданными амплитудами напряжений каждого образца серии представляют графически в координатах «lg e_{ap} – lg N». При этом амплитуду пластических деформаций следует устанавливать расчетом по деформации нулевого полуцикла e_0 по формуле

$$e_{ap} = \frac{\bar{A}}{2}\left(e_0 - \frac{R_{pe}}{E}\right),$$

где $\bar{A}$ — коэффициент, характеризующий связь между e_0 и δ_1 и принимаемый равным среднему арифметическому значению совокупности экспериментальных значений A серии образцов по 5.2.5, определяемых по формуле

$$A = \delta_1\left(e_0 - \frac{R_{pe}}{E}\right).$$

5.2.11 Экспериментальные кривые усталости строят по результатам статистической обработки полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

В случаях определения только амплитуд упругопластических продольных деформаций e_a (без их разделения на упругие и пластические составляющие) построение кривых усталости допускается производить графическим интерполированием.

5.2.12 Расчетные характеристики следует определять по кривым усталости:

- по 5.2.9 и 5.2.11 в пластических деформациях

$$e_{ap}(4N)^m = e_c,$$

где m, e_c — константы уравнений, которые заносят в сводный протокол испытаний;

- по 5.2.9 и 5.2.11 в упругих деформациях

$$e_{ae}(4N)^{m_e} = R_c/E,$$

где m_e, R_c — константы уравнений, которые заносят в сводный протокол испытаний;

- по 5.2.10 и 5.2.11 в пластических деформациях

$$e_{ap}N^{m_1} = e_{cb},$$

где m_1, e_{cb} — константы уравнений, которые заносят в сводный протокол испытаний.

5.2.13 Диаграмму циклического деформирования получают по данным испытаний при заданных амплитудах деформаций для стабилизированного цикла или числа циклов, равного 0,5 долговечности в координатах «размах деформаций $2e_a$ — размах напряжений $2\sigma_a$».

5.2.14 Показатель упрочнения кривой циклического деформирования в неупругой области получают построением кривой деформирования в двойных логарифмических координатах «lg $(2\sigma_a)$ – lg $(2e_a)$» как тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой

$$2\sigma_a = \left(2R_{pe}\right)^{1-\nu}\left(2E\sigma_a\right)^{\nu},$$

где ν — значение показателя упрочнения, полученное как среднеарифметическое не менее чем для трех образцов, — заносят в сводный протокол испытаний.

Диаграмму статического деформирования строят аналогично с заменой $2\sigma_a$, $2e_a$ и $2R_{pe}$ на σ_0, e_0 и R_{pe}.

5.3 Циклическая прочность в многоцикловой области (многоцикловая усталость)

5.3.1 Испытания на многоцикловую усталость материалов следует проводить по принятой методике измерений при испытаниях, включающей процедуру в соответствии с ГОСТ 25.502 и соответствующей требованиям 5.1.3.

5.3.2 Характеристики многоцикловой усталости в заданном диапазоне амплитуд напряжений (деформаций) и при заданной асимметрии должны быть получены по результатам испытаний серии образцов, количество которых при каждой температуре испытаний должно быть не менее 12.

5.3.3 Форму и размеры образцов для испытаний выбирают с учетом формы и размеров сечений заготовок для элементов оборудования и целей испытаний.

Для стержневых и листовых элементов оборудования с толщиной стенки свыше 20 мм используют преимущественно цилиндрические образцы, для тонкостенных элементов оборудования с толщиной стенки до 10 мм — плоские образцы.

5.3.4 При многоцикловом нагружении образцов в качестве основного режима нагружения преимущественно следует применять режим осевого растяжения-сжатия.

5.3.5 Испытания на многоцикловую усталость на воздухе следует проводить:

- при осевом растяжении-сжатии (основной вид нагружения);
- симметричном цикле нагружения;
- числе циклов нагружения свыше $5 \cdot 10^4$ до 10^{12};
- частоте нагружения (до 200 Гц), исключающей саморазогрев образцов более чем на 30 °С от заданной температуры.

5.3.6 При оценке чувствительности материала к асимметрии цикла кроме испытаний при коэффициенте асимметрии $r_\sigma = -1$ должны быть проведены испытания в объеме, указанном в 5.3.2, при значениях $r_\sigma = 0$, где $r_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$.

5.3.7 Допускается проведение испытаний при изгибе с вращением образцов круглого сечения типов I и II по ГОСТ 25.502, при плоском изгибе образцов типов III и IV — по ГОСТ 25.502 и при кручении образцов круглого сечения для соответствующего вида нагружения элемента конструкции.

5.3.8 Порядок проведения испытаний на многоцикловую усталость.

- проведение внешнего осмотра образцов и измерение размеров сечения рабочей части образцов с погрешностью не более 0,5 % номинального размера;
- проведение испытаний первого образца при амплитуде напряжения $(0,6 \div 0,95)R_m^T$ (при нагружении с постоянной амплитудой полной деформации эту амплитуду следует принимать равной 0,4 %);
- проведение испытаний последующих образцов (примерно 2/3 оставшегося количества) при амплитудах напряжений (деформации), обеспечивающих приблизительно равномерное распределение получаемых значений N до образования трещины длиной от 0,5 до 2 мм в заданном диапазоне чисел циклов, указанных в 5.3.5 (условия испытаний выбираются в зависимости от результата испытания первого образца);
- предварительная обработка результатов испытаний с получением кривой усталости;
- проведение испытаний не менее трех образцов при амплитуде напряжений, принимаемой по предварительной кривой усталости для определения предела выносливости на базе испытаний 10^7 циклов. Если два образца из трех испытанных или не менее половины испытанных образцов не разрушаются до достижения заданного числа циклов, то данную амплитуду следует принимать равной пределу выносливости;
- проведение проверки полученного значения предела выносливости испытанием одного образца при амплитуде, равной 0,95 предела выносливости, при этом образец не должен разрушиться при заданном числе циклов;
- окончательная обработка результатов испытаний и определение характеристик многоцикловой усталости, при этом ближайшая к пределу выносливости экспериментальная точка должна быть получена при амплитуде не более 1,05 предела выносливости.

5.3.9 По результатам испытаний составляют сводный протокол, в который заносят исходные данные (марка материала, термообработка, тип заготовки, место и ориентация вырезки образцов, форма, размеры и маркировка образца, условия испытаний) о серии образцов, данные об амплитудах напряжений (деформаций) и долговечности.

5.3.10 Результаты испытаний каждого образца представляют графически в двойных логарифмических координатах «lg σ_a – lg N».

5.3.11 Построение кривых усталости по экспериментальным точкам следует проводить по результатам статистической обработки результатов испытаний методом наименьших квадратов.

5.3.12 По кривой усталости определяют расчетные характеристики — предел выносливости на заданной базе и показатель степени кривой усталости:

$$\sigma_a N^{m_\sigma} = R_{-1} N_0^{m_\sigma},$$

где m_σ — показатель степени кривой усталости.

5.3.13 По результатам испытаний при асимметричном цикле по 5.3.6 определяют значение Ψ_σ по формуле

$$\Psi_\sigma = \frac{\frac{2R_{-1}}{\sigma_{max}} - (1 - r_\sigma)}{1 + r_\sigma}.$$

5.4 Длительная циклическая прочность

5.4.1 Испытания на длительную циклическую прочность следует проводить по принятой методике измерений при испытаниях, включающей процедуру в соответствии с ГОСТ 25.505 и соответствующей требованиям 5.1.3.

Испытания на длительную циклическую прочность проводят на базе $2 \cdot 10^4$ ч при температуре, вызывающей наибольшее снижение длительной пластичности исследуемого материала. Характеристики длительной прочности и пластичности определяют в соответствии с требованиями ГОСТ Р 59115.4.

5.4.2 При испытаниях на усталость основным видом нагружения должно быть осевое растяжение-сжатие с заданными амплитудами деформаций. Допускается проведение испытаний при изгибе с заданным перемещением.

5.4.3 Испытания должны быть проведены до момента образования трещины длиной от 0,5 до 2 мм:

- в малоцикловой области ($10 - 5 \cdot 10^4$ циклов) при симметричном цикле нагружения ($r_\sigma = -1$);
- в многоцикловой области ($5 \cdot 104 - 10^{12}$ циклов) при симметричном и пульсирующем ($r_\sigma = 0$) циклах нагружения.

5.4.4 Частоту нагружения и время выдержки при максимальной деформации цикла принимают такими, чтобы максимальная продолжительность испытаний в пределах данной серии образцов на принятой цикловой базе составляла не менее 10 % длительности эксплуатации элемента конструкции, изготавливаемого из исследуемого материала.

5.4.5 Количество образцов в пределах одной серии должно быть не менее восьми (не менее четырех уровней амплитуд деформаций).

5.4.6 Результаты испытаний представляют в виде кривых усталости по параметру длительности выдержки. Допускается проводить построение кривых усталости по экспериментальным точкам графическим интерполированием.

5.4.7 Расчетные характеристики длительной циклической прочности определяют по ГОСТ Р 59115.4.

5.4.8 По результатам испытаний при асимметричном цикле по 5.4.3 определяют коэффициент чувствительности материала к асимметрии цикла нагружения, используя формулу, приведенную в 5.3.13.

5.5 Циклическая прочность сварных соединений и металла с наплавкой

5.5.1 Испытания на усталость металла различных зон сварных соединений и металла с наплавкой следует проводить по принятой методике измерений при испытаниях, включающей процедуру в соответствии с ГОСТ 25.502, ГОСТ 25.505 и 5.1 — 5.4, и соответствующей требованиям 5.1.3.

5.5.2 При испытании металла сварного шва продольную ось образцов типов II и IV по ГОСТ 25.502 следует располагать в направлении шва в сварном соединении. Допускается использование образцов типов I и III по ГОСТ 25.502 с расположением оси образцов перпендикулярно шву сварного соединения. Для изготовления образцов должны быть использованы сварные соединения первой категории.

5.5.3 При испытании металла переходных зон (зоны сплавления и зоны термического влияния) минимальное сечение образцов типов I и III по ГОСТ 25.502 следует располагать в испытываемой зоне сварного соединения. По результатам испытаний должна быть построена кривая усталости, являющаяся нижней огибающей кривых различных зон сварного соединения. Допускается получать кривую усталости, используя результаты испытания образцов типов II и IV по ГОСТ 25.502, с расположением всех зон сварного соединения в пределах базы измерения продольной деформации.

5.5.4 Определение характеристик циклической прочности металла с наплавкой следует проводить на образцах с сохранением наплавки в натуральную толщину. При этом высота образца должна быть равной $H = 4B$, где B — толщина наплавленного слоя, мм. Для однослойной наплавки допускается

использование образцов с меньшим сечением рабочей части. При этом толщина наплавленного слоя должна быть не менее 1,5 мм.

5.5.5 Для определения диаграммы циклического деформирования металла наплавки должен быть использован образец, целиком вырезанный из металла наплавленного слоя.

5.5.6 Если при испытании металла переходных зон сварных соединений циклические разрушения возникают не в рассматриваемой зоне образца, то расчетную зону образца следует перенести в ту часть, где возникают разрушения.

5.5.7 При испытаниях плоских образцов с наплавкой следует фиксировать зону, в которой возникают трещины (наплавленный слой, поднаплавочная зона, основной металл).

5.5.8 По результатам испытаний на усталость основного металла в соответствии с 5.2 и 5.3, а также металла сварных соединений и металла с наплавкой коэффициент снижения циклической прочности сварного соединения или металла с наплавкой φ_s при N_0 следует определять по формуле

$$\varphi_s = \frac{\bar{e}_{as}}{\bar{e}_a},$$

где $\bar{e}_{as}$ — значение разрушающей амплитуды упругопластической продольной деформации (амплитуды полной деформации) по кривой усталости сварного соединения или металла с наплавкой при N_0;

$\bar{e}_a$ — значение разрушающей амплитуды упругопластической продольной деформации (амплитуды полной деформации) по кривой усталости основного металла при N_0.

5.5.9 Для определения значений φ_s следует использовать кривые «e_a – N», полученные по 5.5.3 и 5.5.4. Если полученное значение $\varphi_s > 1$, то следует принимать $\varphi_s = 1$.

Если в интервале чисел циклов 10 — 10^7 отличие значений φ_s от значений φ_s при $N = 10^4$ окажется не более, чем на ± 10 %, то следует принять минимальное значение φ_s, установленное по кривой «φ_s – N». В остальных случаях значения φ_s следует определять по зависимости «$\varphi_s - \sigma_a(e_a)$», которую используют в расчетах.

5.5.10 Результаты циклических испытаний металла сварных соединений и металла с наплавкой заносятся в сводный протокол испытаний.

5.6 Циклическая прочность основных материалов сварных соединений (металла с наплавкой) в коррозионных средах

5.6.1 Испытания на усталость основных материалов, сварных соединений и металла с наплавкой в коррозионных средах следует проводить по принятой методике измерений при испытаниях, включающей процедуру в соответствии с ГОСТ 25.502 и соответствующей требованиям 5.1.3.

5.6.2 При испытаниях на усталость материалов должны быть определены следующие расчетные характеристики.

- кривые усталости при малоцикловом нагружении с амплитудами упругопластических деформаций на воздухе и в среде при заданных температуре, форме цикла и частоте нагружения;

- коэффициенты коррозионного снижения циклической прочности основного металла ($\varphi_к$, $\bar{\varphi}_к$) и сварного соединения материала (металла с наплавкой) ($\varphi_{кs}$, $\bar{\varphi}_{кs}$).

5.6.3 Коэффициенты коррозионного снижения циклической прочности должны быть определены по результатам испытаний серий образцов материала на воздухе и в коррозионной среде в идентичных условиях по температуре испытания и размерам рабочей части образца.

5.6.4 Значения коэффициентов $\varphi_к$ ($\varphi_{кs}$) равны отношению значения e_a по кривой усталости, полученной при испытаниях в среде, к значению e_a по кривой усталости, полученной при испытаниях на воздухе образцов того же типа, при N_0.

5.6.5 При испытаниях используют образцы типов I—IV по ГОСТ 25.502. При осевом растяжении-сжатии или кручении применяют трубчатый образец, представленный на рисунке 5.1.

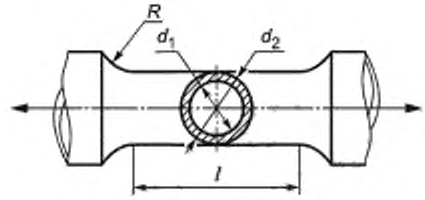


Рисунок 5.1 — Образец для испытаний при осевом растяжении-сжатии и кручении

Для образцов при испытаниях осевым растяжением-сжатием и кручением должны быть выполнены требования: $(d - d_1)/d = 0{,}05 \div 0{,}1$, $(d - d_1) \geq 1$ мм, $R \geq d$, $l = (3 \div 4)d$.

Для образцов растяжения-сжатия значение определяют требованиями устойчивости.

5.6.6 При нагружении чистым или консольным изгибом используют образцы, рабочая часть которых показана на рисунках 5.2 и 5.3. Конструкция переходных зон должна исключать разрушение в их пределах.

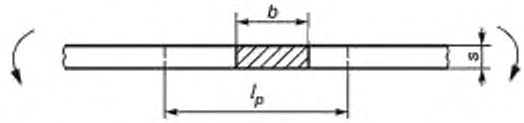


Рисунок 5.2 — Рабочая часть образца для испытаний при чистом изгибе

Для образца для испытаний при чистом изгибе должны быть выполнены требования: $s \geq 2$ мм, $l_p \geq 7_s$, $1{,}5 \leq b/s \leq 2{,}5$.

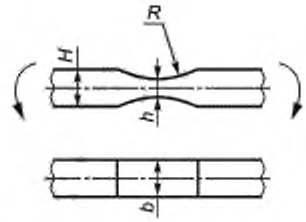


Рисунок 5.3 — Рабочая часть образца для испытаний при консольном изгибе

Для образца для испытаний при консольном изгибе должны быть выполнены требования: $h = 2 \div 10$ мм, $b = (2 \div 10)h$, $H/h = 1{,}5 \div 2$, $R/h \geq 5$.

5.6.7 При испытании образцов, содержащих в пределах рабочей части зону сплавления, измерение и регулирование деформации осуществляются как и для однородного металла.

5.6.8 Количество образцов и требования к их изготовлению указаны в 5.2.

Образцы маркируют с обоих концов в таких местах и таким способом, чтобы не понизить сопротивление циклическому разрушению и обеспечить сохранность маркировки после испытаний.

5.6.9 Образцы следует испытывать в состоянии, соответствующем состоянию металла в изготовленном или эксплуатируемом изделии.

5.6.10 При исследовании механизмов коррозионно-усталостного разрушения допускается предварительная обработка образцов:

- автоклавирование;
- окисление на воздухе при повышенных температурах;
- выдержка при повышенной температуре с предварительной пластической деформацией или без нее;
- провоцирующий нагрев заготовок образцов при исследовании влияния цикла сварки на основной металл в околошовной зоне.

5.6.11 При осевом растяжении-сжатии образцов измерение и контроль деформаций определяют в соответствии с ГОСТ 25.502.

5.6.12 Амплитуду деформации на поверхности рабочей части образца из однородного материала с постоянным прямоугольным поперечным сечением при нагружении чистым (четырехточечным) изгибом определяют по формуле

$$\varepsilon_a = \Delta_a B s / l_p^2,$$

где Δ_a — амплитуда перемещения середины рабочей части относительно средних опор, мм;

s — высота поперечного сечения рабочей части образца, мм;

l_p — длина рабочей части образца (расстояние между средними опорами), мм.

Схема нагружения чистым изгибом приведена на рисунке 5.4.

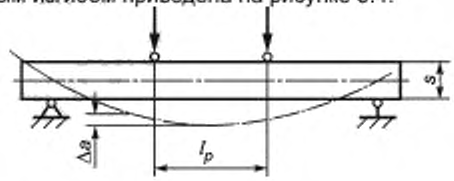


Рисунок 5.4 — Схема нагружения призматического образца чистым изгибом

При испытании образца из однородного или неоднородного материала (например, включающего различные зоны сварного соединения) амплитуду деформаций в рабочей части образца допускается определять экспериментально, например методом тензометрирования.

5.6.13 Деформацию рабочей части образца допускается определять по перемещению захватов вне автоклава с использованием тарировочных зависимостей, получаемых при испытаниях на воздухе.

5.6.14 Испытательное оборудование включает контур, заполненный средой, и нагружающее устройство, которым может служить универсальная или специальная испытательная машина, обеспечивающая поддержание заданного режима нагружения, формы и характеристик цикла.

Испытательное оборудование должно обеспечивать:

- измерение перемещений с погрешностью не более ± 3 % заданного значения;
- погрешность поддержания циклических перемещений не должна превышать ± 5 % заданных значений;
- погрешность поддержания и измерения заданной температуры не должна превышать ± 5 °С в диапазоне температур от 20 °С до 350 °С;
- контроль и поддержание давления с погрешностью не более ± 5 % заданного значения;
- контроль и поддержание среды по значению pH = 4,5 ÷ 10,5, содержанию ионов хлора Cl (до 10 мкг/кг) и кислорода O_2 (до 10 мг/кг), а также по другим составляющим, вводимым в состав реальной рабочей среды, например, при борировании или регулировании содержания кислорода с погрешностью не более ± 10 % заданного значения;
- принудительную циркуляцию среды (допускаются испытания при естественной циркуляции);
- фиксацию момента возникновения трещины длиной от 0,5 мм до 2 мм или разрушения каждого образца в процессе работы испытательной машины.

5.6.15 Испытания проводят:

- при пульсирующем и симметричном циклах деформаций при осевом растяжении-сжатии или кручении цилиндрических и трубчатых образцов, чистом или консольном изгибе плоских образцов. Допускается проведение испытаний только по пульсирующему циклу;
- при числе циклов нагружения от 10^2 до $5 \cdot 10^4$;
- на воздухе и в коррозионной среде при одинаковых температурах (при максимальной температуре рабочей среды в обязательном порядке). Частоту (скорость) нагружения на воздухе определяют требованиями ГОСТ 25.502;
- на воздухе в соответствии с ГОСТ 25.502;
- в среде с выдержкой по времени Δt, равной Δt_0 ($\Delta t_0 \geq 30$ °С), при максимальной деформации растяжения (определяется $\left[\varphi_\varepsilon\left(\varphi_{\varepsilon a}\right)\right]_0$ и $\left[\bar{\varphi}_\varepsilon\left(\bar{\varphi}_{\varepsilon a}\right)\right]_0$ при числах циклов, равных 10^2, 10^3, 10^4 и $5 \cdot 10^4$).

Следующие испытания на циклическую прочность в среде проводят с выдержкой по времени Δt, равной Δt_n:

$$\Delta t_n = m\Delta t_0,$$

где m = 5, 10, 50, ..., и соответственно n = 1, 2, 3, ...

При числах циклов, равных 10^2, 10^3, 10^4 и $5 \cdot 10^4$, определяют значения $\left[\varphi_к(\varphi_{кв})\right]_1$, $\left[\varphi_к(\varphi_{кв})\right]_2$ $\left[\varphi_к(\varphi_{кв})\right]_3$, ..., $\left[\varphi_к(\varphi_{кв})\right]_{n-1}$, $\left[\varphi_к(\varphi_{кв})\right]_n$, $\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_1$, $\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_2$, $\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_3$, ..., $\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_{n-1}$, $\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_n$.

Испытания прекращают, если выполнено условие

$$\left\{\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_{n-1} - \left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_n\right\} \le 0{,}1$$

и на графиках зависимостей «$\varphi_к(\varphi_{кв})$ – lg(Δt)» при числах циклов, равных 10^2, 10^3, 10^4 и $5 \cdot 10^4$, отмечено снижение темпа уменьшения $\varphi_к(\varphi_{кв})$, т. е. испытания на циклическую прочность в среде проводят до выдержки по времени Δt_n, при которой значение $\left|\frac{d\left[\varphi_к(\varphi_{кв})\right]_n}{d\left[\lg(\Delta t_n)\right]}\right|$ при возрастании lg (Δt_n) убывает. Зависимости «$\varphi_к(\varphi_{кв})$ – lg(Δt)», полученные при всех выдержках по времени и числах циклов, приводят в сводном протоколе испытаний.

При $\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_n > 1$ принимают $\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_n = 1$.

5.6.16 Перед испытаниями измеряют размеры поперечного сечения рабочей части образцов с погрешностью не более 0,5 % номинального размера, затем образцы обезжиривают и промывают.

5.6.17 При перерыве в испытаниях на многообразцовой установке проводят осмотр всех образцов, фиксацию в протоколе размеров, числа, особенностей и мест образования трещин.

Испытания прерывают для удаления разрушенных образцов или устранения неисправностей. Время осмотра с целью обнаружения трещин на образцах, испытываемых при минимальной амплитуде деформаций, устанавливают после разрушения образцов с более высокими деформациями на основе анализа результатов испытаний, представленных в координатах «lge_a – lg$N$».

5.6.18 Образцы после испытаний осматривают, фиксируют число и особенности расположения трещин, подвергают металлографическому исследованию. Поверхность излома образца исследуют для установления вида разрушения.

5.6.19 В протоколе испытаний указывают:

- номер образца (маркировку);
- марку материала, его состояние, номер плавки;
- ориентацию вырезки образцов, вид заготовки;
- номер секции и ячейки, в которой размещен образец;
- размеры сечения рабочей части (только до и после испытаний);
- состав среды и даты ее контроля (периодичность контроля устанавливают в процессе подготовки испытаний и корректируют при их проведении);
- температуру, давление среды;
- максимальное и минимальное усилия (факультативно);
- даты начала испытаний, контрольных измерений и окончания испытаний;
- число циклов до разрушения N_f и число циклов до обнаружения трещины N_c;
- информацию о перерывах в испытаниях, уровне нагружения образца при перерыве испытаний, изменениях режима, числе трещин и характере разрушения, о местной и общей коррозии.

5.6.20 Сводный протокол испытаний составляют по протоколам испытаний отдельных образцов серии.

5.6.21 Построение кривых усталости, полученных на воздухе и в среде, проводят в соответствии с разделами 5.2—5.5.

5.6.22 При проведении расчетов на циклическую прочность коэффициент снижения циклической прочности $\varphi_к(\varphi_{кв})$ принимают равным значению $\left[\bar{\varphi}_к(\bar{\varphi}_{кв})\right]_n$, определенному в соответствии с 5.6.15.

5.7 Влияние облучения на циклическую прочность основных материалов и сварных соединений (металла с наплавкой)

5.7.1 Испытания на усталость по определению влияния облучения на циклическую прочность основных материалов, сварных соединений и металла с наплавкой следует проводить по принятой методике измерений при испытаниях, включающей процедуру в соответствии с ГОСТ 25.502 и процедуру облучения образцов и соответствующей требованиям 5.1.3.

Экспериментальное оборудование и количество образцов для проведения испытаний на усталость должны удовлетворять требованиям ГОСТ 25.502.

5.7.2 Испытания должны быть проведены для определения коэффициентов снижения сопротивления циклическому разрушению материалов φ_F, их сварных соединений и металла наплавки φ_{Fs} в результате нейтронного облучения.

5.7.3 Коэффициенты снижения циклической прочности в результате нейтронного облучения должны быть определены по результатам испытаний серий образцов материала в исходном состоянии и после облучения в идентичных условиях по температуре испытания и размерам рабочей части образца.

5.7.4 Образцы для испытаний могут быть облучены предварительно или вырезаны из элемента конструкции, подвергавшегося в процессе эксплуатации действию нейтронного облучения.

5.7.5 Испытания облученных материалов, их сварных соединений и наплавленного металла на циклическую прочность следует проводить в малоцикловой области нагружения (число циклов до разрушения N_F изменяется в интервале от 10 до $5 \cdot 10^4$).

5.7.6 Коэффициент снижения сопротивления малоцикловому разрушению ($\varphi_F = \varphi_{Fs}$) следует определять при симметричном цикле заданных деформаций и температуре 20 °С в зависимости от температуры облучения, флюенса нейтронов и амплитуды деформации.

5.7.7 Геометрия рабочей части образцов должна соответствовать ГОСТ 25.502.

Допускается использование образцов, приведенных на рисунках 5.5—5.7.

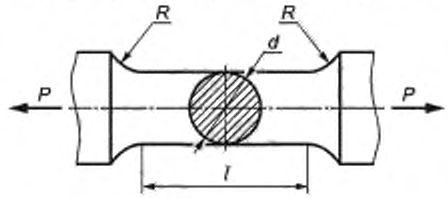


Рисунок 5.5 — Форма рабочей части образца для испытаний в условиях осевого растяжения-сжатия при $R \geq d$

Размеры рабочей части образца, представленного на рисунке 5.5:
- d = 3 мм, l = 6 мм;
- d = 5 мм, l = 10 мм;
- d = 7,5 мм, l = 15 мм;
- d = 10 мм, l = 20 мм.

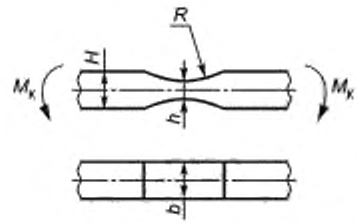


Рисунок 5.6 — Форма рабочей части образца для испытаний при повторном изгибе

Размеры рабочей части образца, представленного на рисунке 5.6:
- h = 2 ÷ 10 мм;
- b = 2 ÷ 10 мм;
- H/h = 1,5 ÷ 2;
- $R/h \geq 5$.

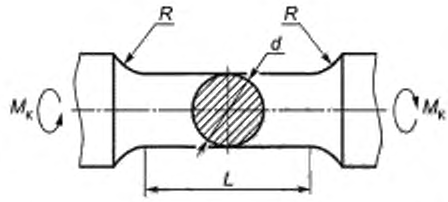


Рисунок 5.7 — Форма рабочей части образца для испытаний при повторном кручении

Размеры рабочей части образца, представленного на рисунке 5.7:

- d = 3 ÷ 10 мм;
- $L = 3d$;
- $R \geq d$.

5.7.8 Формы и размеры головок образцов следует выбирать в зависимости от условий облучения (теплосъема и крепления в навеске или ампуле) и способа его крепления в захватах испытательной машины.

Все образцы должны быть промаркированы с обоих концов, причем маркировка должна быть сохранена на всех стадиях облучения и последующего испытания.

5.7.9 Облучение образцов может быть произведено как в исследовательских, так и в энергетических реакторах; как в сухих ампулах, так и в потоке теплоносителя.

При проведении облучения образцов следует выполнять следующие требования:

а) образцы-свидетели, загружаемые в корпус ядерного энергетического реактора, размещают в герметичных контейнерах, собираемых в гирлянду;

б) при облучении образцов, загружаемых в реактор в герметичных ампулах, должен быть обеспечен надежный отвод тепла от образца с помощью наполнителей (алюминий, гелий, натрий или другие);

в) отклонение температуры от заданной при облучении на стационарном режиме не должно превышать ± 10 °С;

г) при облучении образцов в герметичных ампулах непрерывный контроль температуры должен быть осуществлен термопарами, закрепленными на образцах точечной сваркой на их поверхности или запрессованными внутрь образца. Расстояние между термопарами определяют конструкцией облучательного устройства, но не должно быть более 200 мм.

Контроль за изменением температуры в процессе облучения должен быть осуществлен автоматически с записью на самопишущих приборах. Погрешность показаний должна быть не более ± 5 °С. Рекомендуется устанавливать индикаторы фиксации максимальной температуры облучения, которые должны быть установлены непосредственно на образцах.

В случае невозможности установки термопар при облучении в энергетических реакторах допускается проводить контроль максимальной температуры облучения только при помощи алмазных мониторов или плавких термоиндикаторов;

д) при облучении образцов в негерметичных ампулах температура облучения контролируется по температуре теплоносителя на входе и выходе из активной зоны или технологического канала;

е) плотность потока быстрых нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ по высоте размещения образцов, предназначенных для определения φ_F и φ_{Fs} при выбранном значении переноса нейтронов, не должна различаться более чем на 15 %;

ж) перенос быстрых нейтронов, воздействующих на образцы, определяют с помощью активационных индикаторов. Количество индикаторов и расстояние между ними в радиальном и осевом направлениях облучательного устройства выбирают в зависимости от его геометрии и размеров, но не менее трех (в центре и по краям). Погрешность определения переноса нейтронов должна быть не более ± 15 % измеряемой величины;

и) отчет о проведении облучения должен содержать следующие данные:

1) номенклатуру и порядок размещения образцов в реакторе,

2) энергетический спектр нейтронов в месте размещения образцов в реакторе,

3) записи температуры образцов в процессе облучения, тип термопар и способ их крепления,

4) распределение температуры по высоте облучательного устройства за весь период облучения,

5) тип индикаторов для определения переноса нейтронов и их распределение по сечению и высоте облучательного устройства,

6) график работы реактора с остановками на планово-предупредительный ремонт,

7) давление, температуру, скорость и химический состав теплоносителя и их изменение в процессе облучения образцов,

8) приведенное к 100 % мощности реактора время облучения образцов;

к) после облучения образцов в контакте с теплоносителем должно быть сделано заключение об их внешнем виде, произведен анализ содержания и распределения в образцах водорода, а также дано заключение о коррозионном воздействии теплоносителя на материал образцов.

5.7.10 Испытание облученных образцов на малоцикловую усталость следует проводить при нагружении заданными деформациями (осевое растяжение-сжатие, повторный изгиб или кручение) по симметричному циклу при температуре 20 °С.

5.7.11 Испытание облученных образцов следует проводить по той же методике, что и испытание образцов в исходном состоянии.

5.7.12 Конструкция оборудования должна быть такова, чтобы закрепление образцов в захватах машины, операции по настройке ее на заданный режим нагружения и установка экстензометра (тензорезистора) на рабочей части образца могли осуществляться дистанционно при помощи манипулятора.

Экстензометры и динамометрический элемент машины должны проходить тарировку не реже 1 раза в год.

5.7.13 Значения коэффициентов φ_F и φ_{Fs} для данных условий облучения следует определять как отношение амплитуд деформаций образцов облученного e_{aF} и необлученного e_a материалов при одинаковом числе циклов и представляют в виде $\varphi_F = f(e_a)$ $\left[\varphi_{Fa} = f\left(e_a\right)\right]$. При определении значения φ_{Fs} следует использовать кривые усталости, являющиеся нижними огибающими кривых усталости для различных зон сварного соединения или наплавки, включая переходные зоны материала в облученном и необлученном состояниях.

Приложение А
(рекомендуемое)

Расчетные кривые усталости

А.1 Расчетные кривые усталости при кратковременном нагружении

А.1.1 На рисунках А.1—А.4 приведены расчетные кривые усталости, полученные с использованием значений характеристик физических и механических свойств материалов, приведенных в ГОСТ Р 59115.2 и ГОСТ Р 59115.3.

А.1.2 На рисунках А.1 и А.2 приведены расчетные кривые усталости для материалов из углеродистых и легированных сталей и сталей аустенитного класса, полученные с учетом коэффициентов запаса $n_\sigma = 2$ и $n_N = 10$. Эти расчетные кривые допускается использовать при коэффициентах асимметрии цикла напряжений $r \le 0$.

На рисунках А.3 и А.4 приведены расчетные кривые усталости для резьбовых участков шпилек, болтов из сталей перлитного класса, полученные с учетом коэффициентов запаса $n_\sigma = 1{,}5$ и $n_N = 5$ при различных значениях коэффициентов асимметрии.

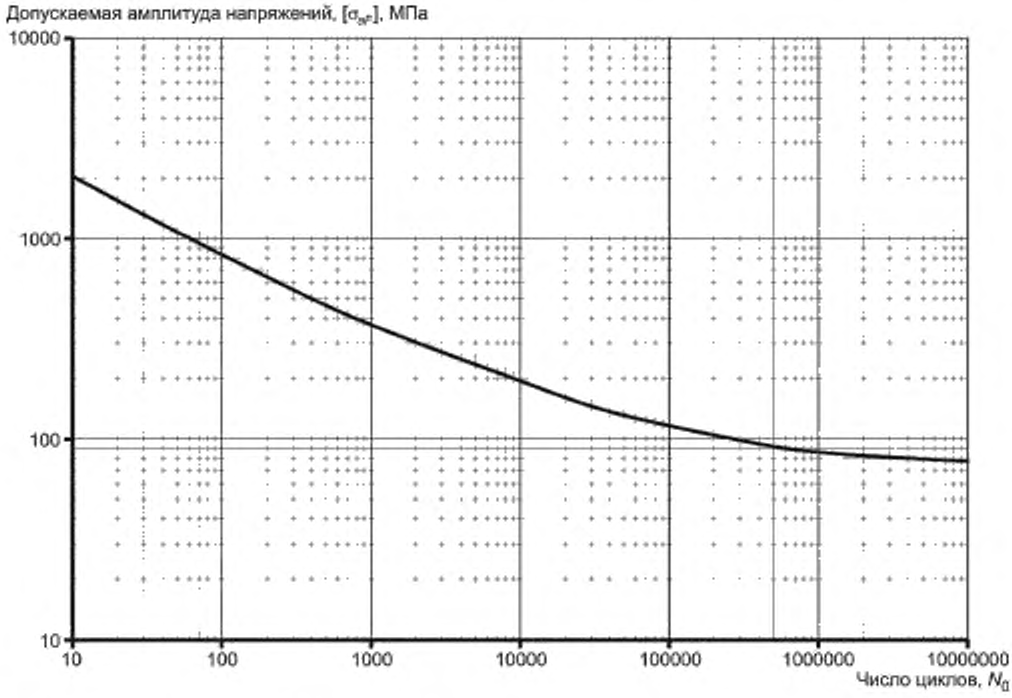


Рисунок А.1 — Расчетная кривая усталости материалов из углеродистых и легированных сталей ($R^T_{p0,2}/R^T_m \le 0{,}7$, $R^T_m \ge 450$ МПа, $Z^T \ge 32$ % и $E^T \ge 175$ ГПа) в интервале температур от 20 °С до 350 °С

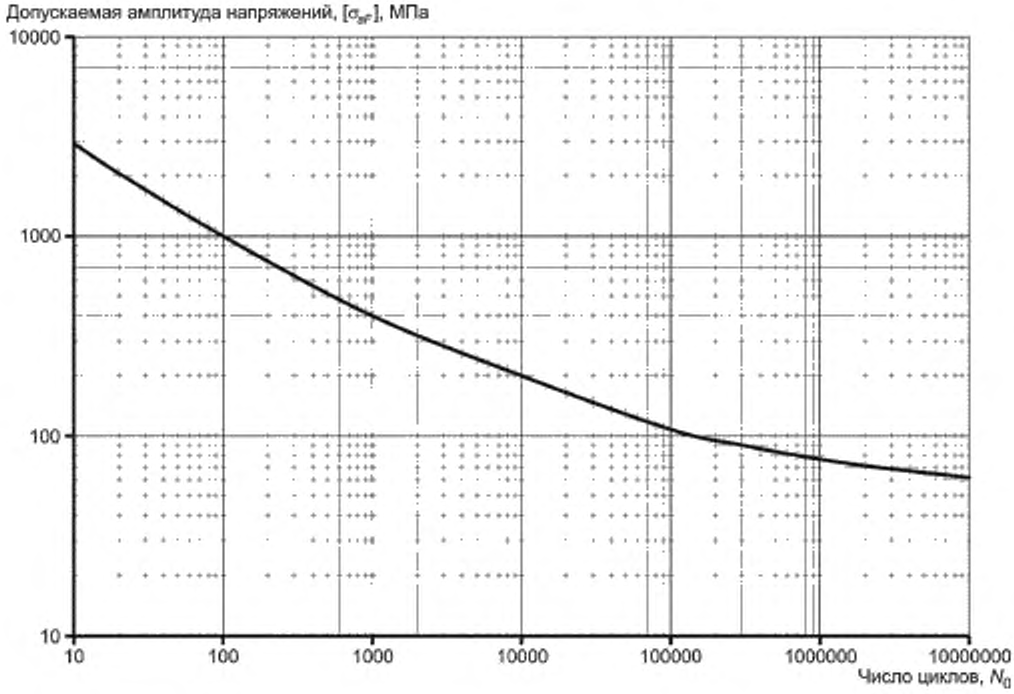
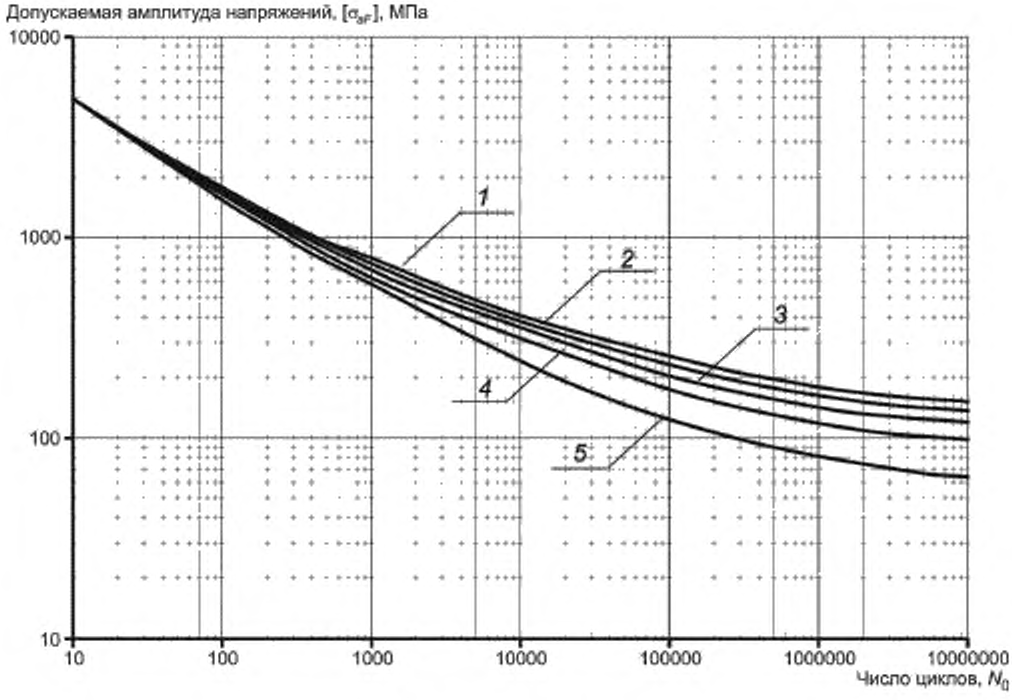


Рисунок А.2 — Расчетная кривая усталости материалов из сталей аустенитного класса ($R^T_{p0,2}/R^T_m \le 0,7$, $R^T_m \ge 360$ МПа, $Z^T \ge 45$ % и $E^T \ge 167$ ГПа) в интервале температур от 20 °С до 450 °С



1 – r = 0; *2* – r = 0,2; *3* – r = 0,4; *4* – r = 0,6; *5* – r = 0,8

Рисунок А.3 — Расчетные кривые усталости для резьбовых участков шпилек и болтов из сталей перлитного класса с $650 \le R_m^T < 750$ МПа до температуры T = 350 °С при различных значениях коэффициента асимметрии r

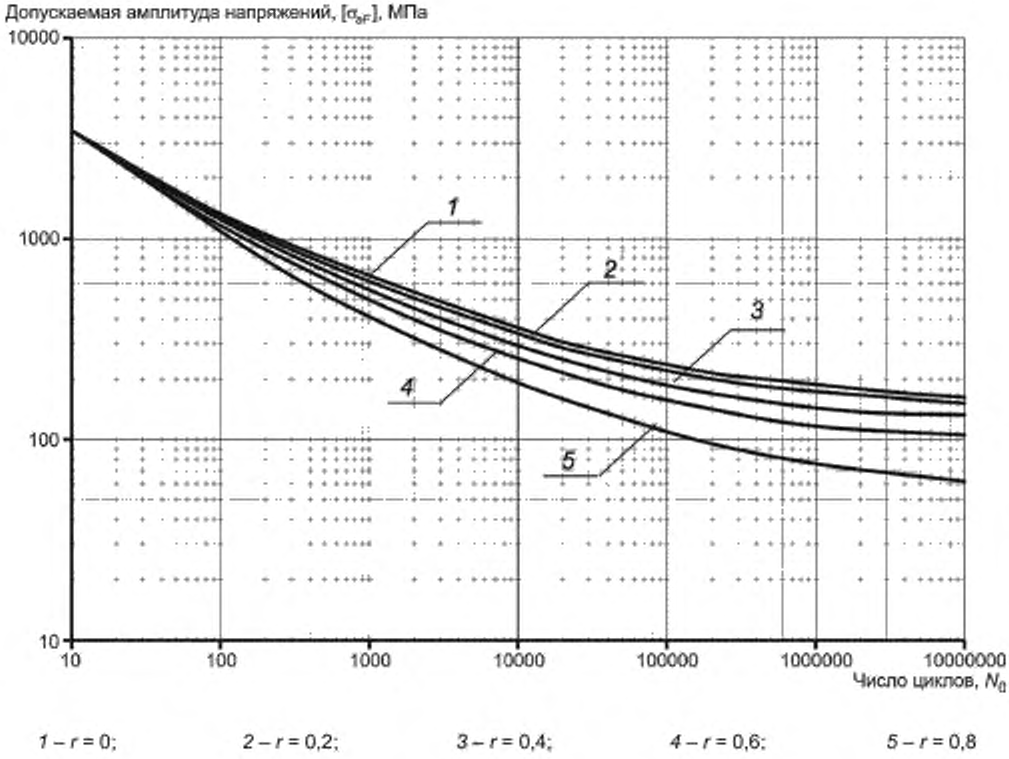


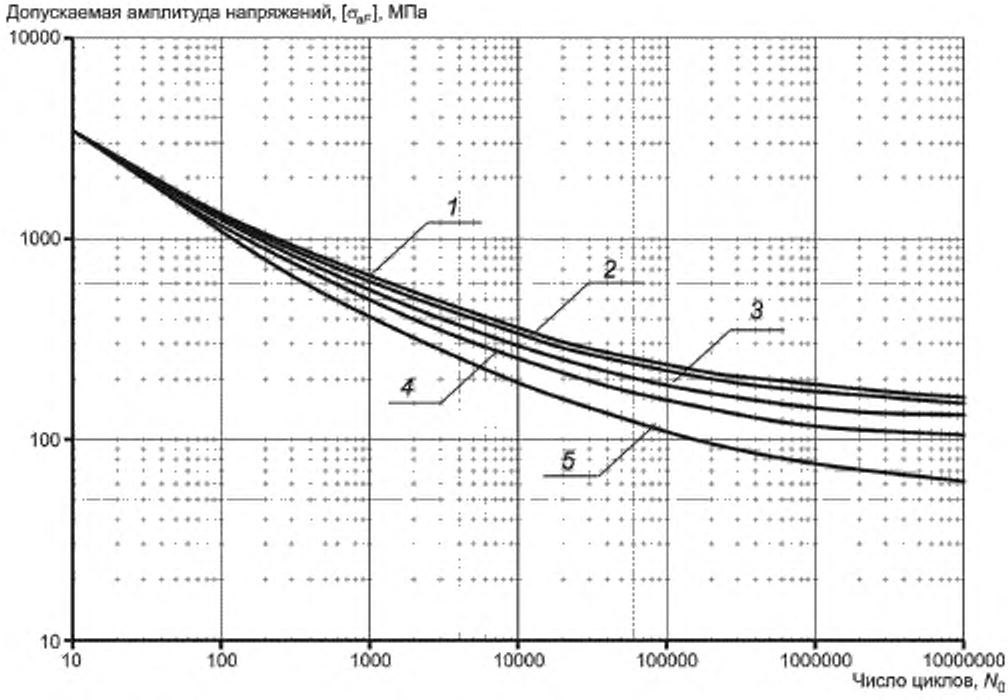
Рисунок А.4 — Расчетные кривые усталости для резьбовых участков шпилек и болтов из сталей перлитного класса с $R_m^T \geq 760$ МПа до температуры T = 350 °С при различных значениях коэффициента асимметрии r

А.2 Расчетные кривые усталости при длительном нагружении

А.2.1 На рисунках А.5—А.8 приведены расчетные кривые усталости при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч, полученные с использованием значений характеристик физических и механических свойств материалов, приведенных в ГОСТ Р 59115.2—ГОСТ Р 59115.4.

А.2.2 На рисунках А.5—А.8 приведены расчетные кривые усталости при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч для материалов из легированных сталей, сталей аустенитного класса, железоникелевого сплава ХН35ВТ и сплава циркония с 2,5 % ниобия, полученные при симметричном цикле с учетом коэффициентов запаса $n_\sigma = 2$ и $n_N = 10$.

А.2.3 Расчетные кривые усталости при промежуточных температурах могут быть получены интерполяцией напряжений.



1 — температура нагружения 350 °С, *2* — температура нагружения 375 °С, *3* — температура нагружения 400 °С; *4* — температура нагружения 450 °С. *5* — температура нагружения 500 °С

Рисунок А.5 — Расчетные кривые усталости материалов из легированных сталей при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

Значения характеристик механических свойств материалов при использовании кривых, показанных на рисунке А.5, должны быть:

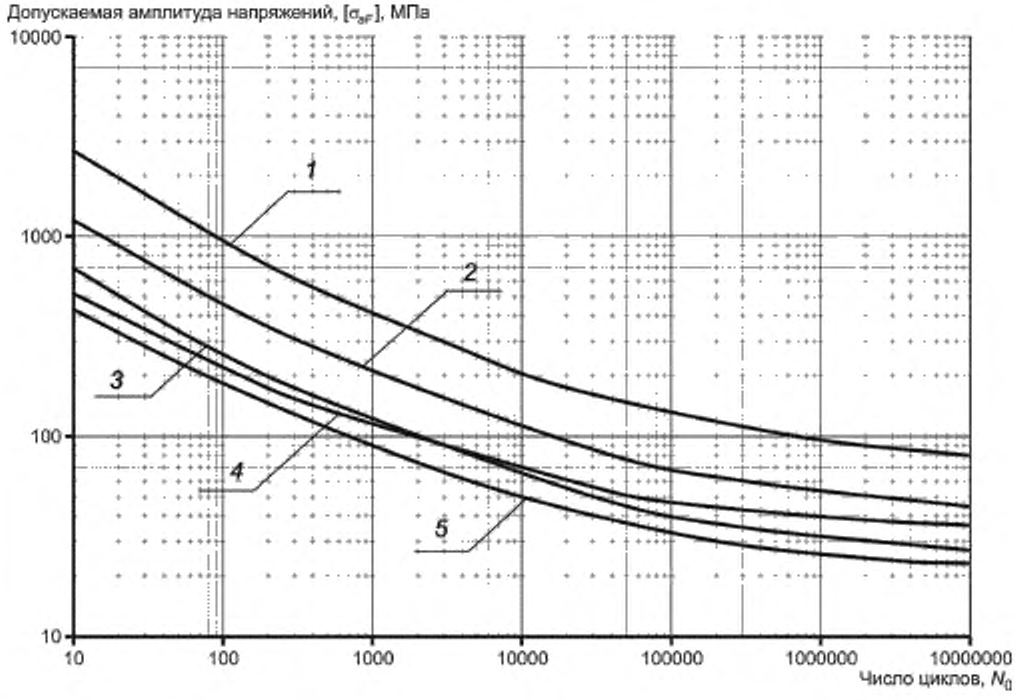
а) при температуре нагружения до 350 °С: $R^T_{p0,2}/R^T_m \le 0,7$; $R^T_m \ge 460$ МПа; $Z^T \ge 32$ %; $E^T \ge 175$ ГПа;

б) при температуре нагружения выше 350 °С при длительности нагружения $t \le 2 \cdot 10^5$ ч:

1) до 400 °С: $R^T_{p0,2} \ge 195$ МПа, $A^T_5 \ge 18$ %; $E^T \ge 185$ ГПа,

2) до 450 °С: $R^T_{p0,2} \ge 180$ МПа, $A^T_5 \ge 15$ %; $E^T \ge 180$ ГПа,

3) до 500 °С: $R^T_{p0,2} \ge 95$ МПа, $A^T_5 \ge 18$ %; $E^T \ge 175$ ГПа.



1 — температура нагружения 450 °С; *2* — температура нагружения 475 °С; *3* — температура нагружения 500 °С; *4* — температура нагружения 550 °С; *5* — температура нагружения 600 °С

Рисунок А.6 — Расчетные кривые усталости материалов из коррозионно-стойких сталей аустенитного класса при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

Значения характеристик механических свойств материалов при использовании кривых, показанных на рисунке А.6, должны быть:

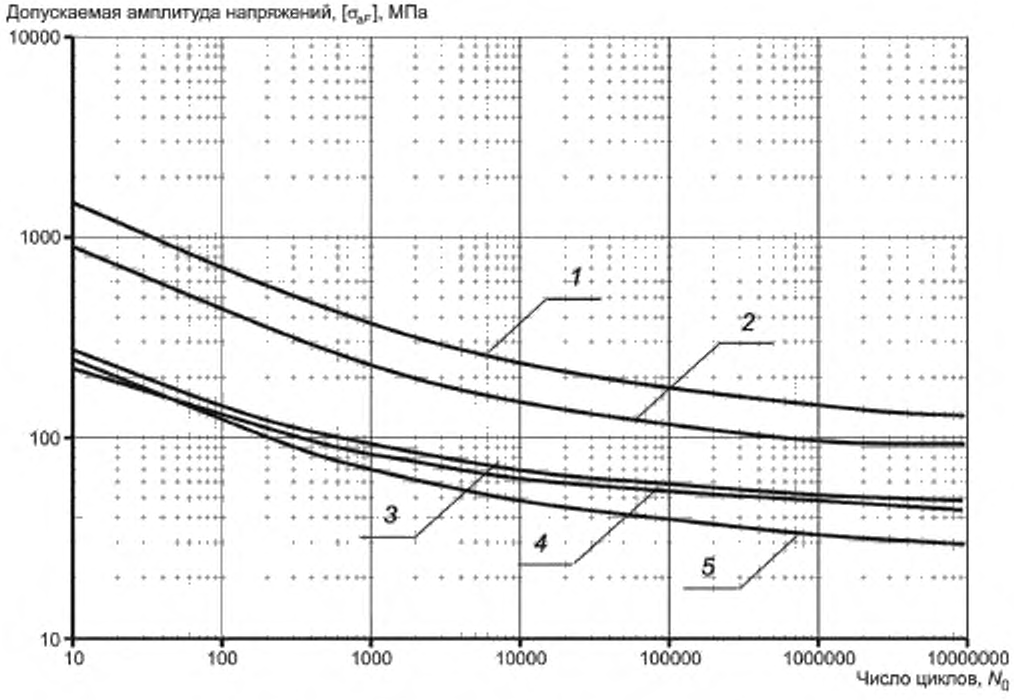
а) при температуре нагружения до 450 °С: $R^T_{p0,2}/R^T_m \le 0,7$; $R^T_m \ge 360$ МПа; $Z^T \ge 45$ %; $E^T \ge 167$ ГПа;

б) при температуре нагружения выше 450 °С при длительности нагружения $t \le 2 \cdot 10^5$ ч:

1) до 500 °С: $R^T_{p0,2} \ge 166$ МПа, $A^T_t \ge 10$ %; $E^T \ge 165$ ГПа,

2) до 550 °С: $R^T_{p0,2} \ge 117$ МПа, $A^T_t \ge 16$ %; $E^T \ge 162$ ГПа,

3) до 600 °С: $R^T_{p0,2} \ge 107$ МПа, $A^T_t \ge 10$ %; $E^T \ge 160$ ГПа.



1 — температура нагружения 450 °С, *2* — температура нагружения 475 °С, *3* — температура нагружения 500 °С; *4* — температура нагружения 550 °С. *5* — температура нагружения 600 °С

Рисунок А.7 — Расчетные кривые усталости материалов из железоникелевых дисперсионно-твердеющих сплавов (ХН35ВТ) при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

Значения характеристик механических свойств материалов при использовании кривых, показанных на рисунке А.7, должны быть:

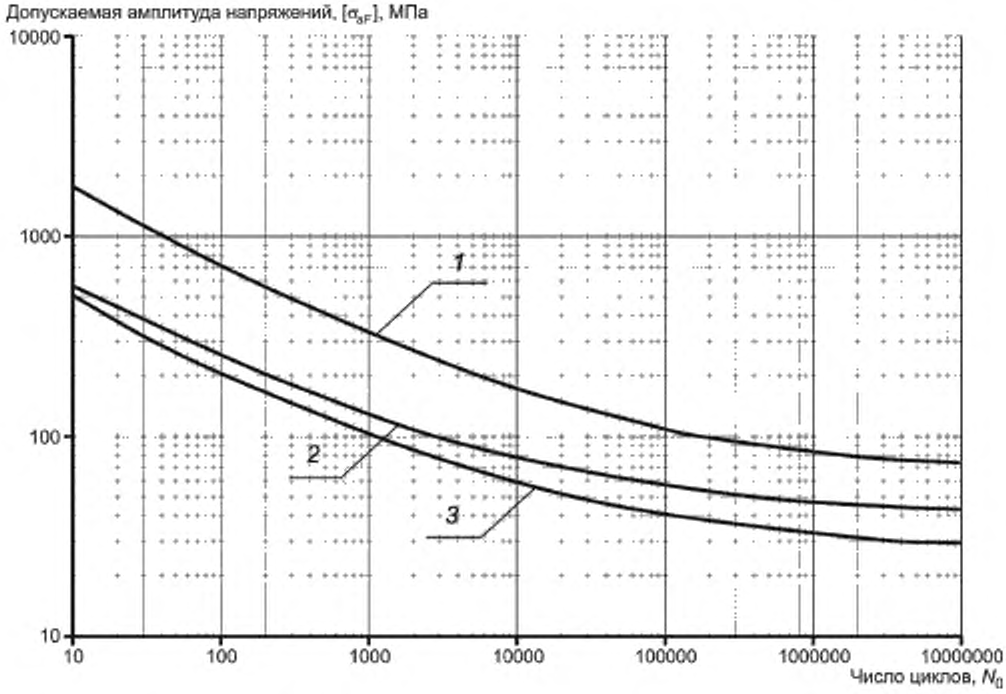
а) при температуре нагружения до 450 °С: $R^T_{p0,2}/R^T_m \le 0,7$; $R^T_m \ge 620$ МПа; $Z^T \ge 24$ %; $E^T \ge 167$ ГПа;

б) при температуре нагружения выше 450 °С при длительности нагружения $t \le 10^5$ ч:

1) до 500 °С: $R^T_{cr} \ge 240$ МПа, $A^T_t \ge 3$ %; $E^T \ge 165$ ГПа,

2) до 550 °С: $R^T_{cr} \ge 210$ МПа, $A^T_t \ge 3$ %; $E^T \ge 162$ ГПа,

3) до 600 °С: $R^T_{cr} \ge 115$ МПа, $A^T_t \ge 4$ %; $E^T \ge 160$ ГПа.



1 — температура нагружения 250 °С, *2* — температура нагружения 300 °С, *3* — температура нагружения 350 °С

Рисунок А.8 — Расчетные кривые усталости материалов из сплава циркония с 2,5 % ниобия при длительности нагружения $2 \cdot 10^5$ ч

Значения характеристик механических свойств материалов при использовании кривых, показанных на рисунке А.8, должны быть:

а) при температуре нагружения до 250 °С: $R_m^T \geq 335$ МПа; $Z^T \geq 57$ %; $E^T = 75{,}5$ ГПа;

б) при температуре нагружения выше 250 °С при длительности нагружения $t \leq 2 \cdot 10^5$ ч:

1) до 300 °С: $R_{m2}^T \geq 205$ МПа, $A_t^T \geq 22$ %; $E^T = 76{,}2$ ГПа,

2) до 350 °С: $R_{m2}^T \geq 140$ МПа, $A_t^T \geq 24$ %; $E^T = 69$ ГПа.

Библиография

[1]	Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-089-15	Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.99

Ключевые слова: оборудование, трубопроводы, конструкционные материалы, циклическая прочность, кривые усталости

Редактор *З.Н. Киселева*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *И.Ю. Литовкиной*

Сдано в набор 20.10.2021. Подписано в печать 02.11.2021. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч-изд. л. 2,77.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта
Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru