ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59115.10— 2021

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Уточненный поверочный расчет на стадии проектирования

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2021

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» им. И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей»)

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. № 1173-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 стандарте 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 и определения 2
4 Сокращения и обозначения 3
5 Общие положения 5
6 Условия обоснования прочности компонента 6
7 Расчетный (постулируемый) дефект 7
8 Расчет на длительную статическую прочность 8
9 Расчет на длительную циклическую прочность 11
10 Расчет на прогрессирующее изменение размеров 13
11 Расчет на одностороннее накопление вязкопластических деформаций при термоциклическом нагружении 14
12 Расчет на сопротивление разрушению 18
Приложение А (рекомендуемое) Физико-механические свойства и диаграмма деформирования 25
Приложение Б (рекомендуемое) Статическая трещиностойкость 28
Приложение В (рекомендуемое) Скорость роста трещины при циклическом нагружении 29
Приложение Г (рекомендуемое) Скорость роста трещины при ползучести 31
Приложение Д (рекомендуемое) Скорость ползучести 32
Приложение Е (рекомендуемое) Уравнения для определения напряженно-деформированного состояния компонента 34
Приложение Ж (обязательное) Процедура формирования циклов при сложном нагружении и расчет усталостного повреждения 38
Приложение И (рекомендуемое) Расчетные кривые усталости 44
Приложение К (рекомендуемое) Процедура расчета референсного напряжения для вычисления C*-интеграла 47
Приложение Л (рекомендуемое) Процедура расчета референсного напряжения для анализа потери несущей способности компонента 49
Приложение М (обязательное) Расчет коэффициентов ω и ω_b, учитывающих влияние коротких трещин и двухосного нагружения на трещиностойкость 54
Библиография 55

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

Уточненный поверочный расчет на стадии проектирования

Rules for strength assessment of equipment and pipelines of nuclear power installations. Confirmatory analysis on stage of design

Дата введения — 2022—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает требования к проведению уточненных поверочных расчетов на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок на стадии проектирования, на которые распространяется действие федеральных норм и правил [1].

1.2 Настоящий стандарт следует применять совместно с ГОСТ Р 59115.9 для оборудования и трубопроводов, которые подвергаются облучению до флюенса не более $1 \cdot 10^{22}$ нейтр·м$^{-2}$ для материалов ферритного класса и не более $2 \cdot 10^{25}$ нейтр·м$^{-2}$ для материалов аустенитного класса при $E \geq 0{,}1$ МэВ.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

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

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

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

ГОСТ Р 59115.4—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Длительные механические свойства конструкционных материалов

ГОСТ Р 59115.5 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчетные характеристики циклической и длительной циклической прочности конструкционных материалов

ГОСТ Р 59115.6 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Методы определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов

ГОСТ Р 59115.8 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет по выбору основных размеров

ГОСТ Р 59115.9—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на прочность

ГОСТ Р 59115.14 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агент-

Издание официальное

ства 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 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 и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ Р 59115.1, ГОСТ Р 59115.2, ГОСТ Р 59115.3, ГОСТ Р 59115.4, ГОСТ Р 59115.6 и ГОСТ Р 59115.9, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **вторичная нагрузка:** Нагрузка на элемент, обусловленная физическими воздействиями, приводящими к самоуравновешенным полям напряжений (остаточные сварочные напряжения, температурные напряжения, напряжения, обусловленные радиационным распуханием).

3.2 **деформация ползучести:** Необратимая деформация, возникающая в материале под действием напряжения в условиях ползучести с течением времени.

3.3 **критическое событие:** Событие, которое может привести к снижению прочности или нарушению прочности, либо к недопустимому изменению размеров элемента (компонента).

Примечание — Критическим событием является любое событие из следующего перечня: зарождение трещины при статическом нагружении в условиях ползучести, зарождение трещины при циклическом нагружении в условиях взаимодействия ползучести и усталости, зарождение трещины в результате достижения предельной величины накопленной односторонней деформации при термоциклическом нагружении, нестабильное развитие трещины, потеря несущей способности, достижение предельных изменений размеров элемента (компонента).

3.4 **критическое событие «Зарождение трещины при статическом нагружении в условиях ползучести»:** Состояние элемента (компонента), при котором в какой-либо его зоне перестают выполняться условия прочности по критерию зарождения трещины по механизму ползучести.

3.5 **критическое событие «Зарождение трещины при циклическом нагружении в условиях взаимодействия ползучести и усталости»:** Состояние элемента (компонента), при котором в какой-либо его зоне перестают выполняться условия прочности по критерию зарождения трещины по механизму, характеризующемуся взаимным ускорением накопления повреждений при усталости и ползучести.

3.6 **критическое событие «Зарождение трещины в результате достижения предельной величины накопленной односторонней деформации при термоциклическом нагружении»:** Состояние элемента (компонента), при котором в какой-либо его зоне перестают выполняться условия прочности по критерию зарождения трещины при одностороннем накоплении деформации при термоциклическом нагружении.

3.7 **критическое событие «Нестабильное развитие трещины»:** Состояние элемента (компонента), когда в какой-либо его зоне в процессе эксплуатации происходит нестабильное, т. е. не требующее увеличения нагрузки, развитие имеющейся в этой зоне трещины.

3.8 **критическое событие «Потеря несущей способности»:** Состояние элемента (компонента), при котором его дальнейшее деформирование происходит без дополнительного нагружения.

3.9 **критическое событие «Достижение предельных изменений размеров»:** Достижение элементом (компонентом) в процессе эксплуатации такого изменения его размеров, при котором нарушается нормальное функционирование этого и (или) соседних элементов (компонентов).

3.10 **пластическая деформация:** Необратимая деформация, вызванная напряжением при превышении предела текучести и определяемая на основе теории пластичности.

3.11 **повреждающая доза:** Интегральная характеристика, отражающая степень радиационного повреждения металла, определяемая как накопленное за определенное время число смещений каждого атома кристаллической решетки под действием нейтронного и гамма-излучения.

Примечание — Повреждающая доза зависит от спектра ионизирующего излучения, времени облучения, числа атомов в единице объема, сечения столкновений, вызывающих смещения.

3.12 **расчет в упругой постановке:** Расчет по определению напряженно-деформированного состояния элемента (компонента) в предположении упругого поведения материала на основе теории упругости.

3.13 **расчет в вязкоупругой постановке:** Расчет по определению напряженно-деформированного состояния элемента (компонента) в предположении вязкоупругого поведения материала на основе теорий упругости и ползучести.

3.14 **расчет в упруго-вязкопластической постановке:** Расчет по определению напряженно-деформированного состояния элемента (компонента) в предположении упруго-вязкопластического поведения материала на основе теорий упругости, ползучести и пластичности.

3.15 **расчетный дефект:** Дефект в виде трещины (полуэллиптической или четверть эллиптической формы) с заданными размерами полуосей, расположением и ориентацией, постулируемый в рассматриваемом элементе (компоненте) с целью расчета на нестабильное развитие трещины и потерю несущей способности, в том числе с учетом стабильного роста трещин.

3.16 **расчетная модель,** *расчетная схема:* Идеализированное описание компонента, используемое для расчета на прочность оборудования и трубопроводов и учитывающее реализующуюся при эксплуатации совокупность параметров нагружения (значения механических нагрузок, температур, дозы радиационного облучения, количество циклов нагружения и т. д.), геометрию и граничные условия.

3.17 **референсное напряжение:** Эффективное напряжение, действующее в компоненте с трещиной и отражающее степень нагруженности компонента вплоть до потери его несущей способности.

4 Сокращения и обозначения

4.1 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АЭУ — атомная энергетическая установка;

ГМО — головная материаловедческая организация;

КИН — коэффициент интенсивности напряжений;

МВФ — метод весовых функций;

НДС — напряженно-деформированное состояние;

ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;

НУЭ — нормальные условия эксплуатации;

НЭК — неразрушающий эксплуатационный контроль.

4.2 Обозначения

4.2.1 Геометрические параметры:

a, c — размеры малой и большой полуоси расчетной трещины, мм;

a_0, c_0 — начальные размеры малой и большой полуоси расчетной трещины, мм;

l_0 — максимально возможный размер дефекта технологического происхождения (в сварном шве), мм;

a_N, c_N — размеры полуосей расчетной трещины после нагружения последним циклом в рассматриваемом периоде эксплуатации, мм;

a_τ, c_τ — размеры полуосей расчетной трещины на конец рассматриваемого периода эксплуатации в условиях ползучести, мм;

$a_{\tau N}$, $c_{\tau N}$ — размеры полуосей расчетной трещины, развитие которого происходит при длительном (по механизму ползучести) и циклическом (по механизму усталости) нагружениях за рассматриваемый период эксплуатации, мм;

$S_к$ — толщина стенки компонента, мм.

4.2.2 Параметры нагружения:

K_I — коэффициент интенсивности напряжений (КИН) I-го рода, МПа·$\sqrt{\text{м}}$;

P_{Holl} — параметр Холломона;

T — температура, °С;

T_t — температура, при превышении которой необходимо учитывать характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести;

t — время, ч;

Δt — временной интервал, ч;

t_f — время до разрушения при испытаниях на длительную прочность, ч;

σ_m, σ_{mL}, σ_b — общие мембранные, местные мембранные и общие изгибные напряжения соответственно, МПа.

4.2.3 Механические и физические свойства:

E^T — модуль упругости при температуре T, МПа;

G — модуль сдвига, МПа;

K — коэффициент объемного сжатия, $МПа^{-1}$;

$R^T_{p0,2}$ — минимальное значение предела текучести при температуре T, МПа;

$\overline{R}_m$ — среднее значение предела прочности, МПа;

R^T_m — минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при температуре T, МПа;

$\overline{R}_{p0,2}$ — среднее значение предела текучести, МПа;

R^T_{mt} — минимальное значение условного предела длительной прочности за время t при температуре T, МПа;

$\overline{R}^T_{mt}$ — среднее значение условного предела длительной прочности за время t при температуре T, МПа;

$\overline{R}^T_c$ — среднее значение истинного напряжения при разрыве при длительном статическом нагружении, МПа;

R^T_c — минимальное значение истинного напряжения при разрыве при длительном статическом нагружении, МПа;

Z^T — относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва при кратковременных испытаниях на растяжение, %;

Z^T_t — относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва при испытаниях на длительную прочность, %;

σ_f — истинное напряжение в момент разрушения образца при кратковременном растяжении, МПа;

ε_f — деформация разрушения при кратковременных испытаниях на растяжение;

ε^T_{ft} — деформация разрушения при испытаниях на длительную прочность (длительная пластичность);

ν — коэффициент Пуассона.

4.2.4 Параметры механики разрушения и повреждения:

K_{JC} — трещиностойкость, $МПа\cdot\sqrt{м}$;

J_c — критическое значение J-интеграла, Н/мм;

C^* — контурный C^*-интеграл для описания роста трещины при ползучести, Н/(мм·ч);

ΔK — размах КИН, $МПа\cdot\sqrt{м}$;

K_{max}, K_{min} — максимальный и минимальный КИН в цикле нагружения соответственно, $МПа\cdot\sqrt{м}$;

ΔK_a, ΔK_c — размахи КИН I-го рода в точках a и c расчетной трещины, $МПа\cdot\sqrt{м}$;

ΔK_{th} — пороговый размах КИН I-го рода, $МПа\cdot\sqrt{м}$;

D_N — повреждение при циклическом нагружении;

D_τ — повреждение при длительном статическом нагружении;

$D_{N\tau}$ — повреждение при циклическом и длительном статическом нагружении;

$f_C(D_N, D_\tau)$ — критическое повреждение при длительном циклическом нагружении;

$[N_f]$ — допускаемое количество циклов нагружения;

r — коэффициент асимметрии цикла нагружения.

4.2.5 Параметры напряженно-деформированного состояния:

σ — напряжение, МПа;

σ_1 — максимальное главное напряжение, МПа;

σ_{eq} — интенсивность напряжений (приведенные напряжения), определяемая на основании теории Мизеса, МПа;

σ_0 — гидростатическое напряжение, МПа;

σ_m, σ_b, σ_{mL}, σ_{bL} — общие мембранные, общие изгибные, местные мембранные и местные изгибные напряжения соответственно, МПа;

σ_{ref} — референсное напряжение, МПа;
$æ_p$ — накопленная пластическая деформация;
ξ_{ref} — скорость деформации ползучести, вычисленная при напряжении, равном σ_{ref}, $ч^{-1}$.

5 Общие положения

5.1 Настоящий стандарт регламентирует уточненные поверочные расчеты на прочность оборудования и трубопроводов на стадии проектирования по критериям длительной статической прочности, циклической прочности, длительной циклической прочности, достижения предельных изменений размеров элемента (компонента), достижения предельной величины накопленной односторонней деформации при термоциклическом нагружении, а также по критериям нестабильного развития трещин при усталости и ползучести.

Уточненные поверочные расчеты проводят с использованием номинальных значений размеров, установленных в проекте после расчета по выбору основных размеров согласно ГОСТ Р 59115.8.

5.2 Компонент, рассчитываемый на прочность, должен удовлетворять всем условиям статической прочности, предъявляемым к расчету на прочность оборудования и трубопроводов на стадии проектирования во всем диапазоне температур режимов эксплуатации согласно ГОСТ Р 59115.9.

5.3 Обоснование прочности компонентов должно проводиться посредством анализа критических событий согласно 5.3.1—5.3.6, определяющих предельные состояния (см. таблицу 5.1).

5.3.1 Нестабильное развитие трещины.

5.3.2 Зарождение трещины при статическом нагружении в условиях ползучести.

5.3.3 Потеря несущей способности.

5.3.4 Зарождение трещины при циклическом нагружении в условиях взаимодействия ползучести и усталости.

5.3.5 Достижение предельных изменений размеров.

5.3.6 Зарождение трещины в результате достижения предельной величины накопленной односторонней деформации при термоциклическом нагружении.

5.3.7 Достижение предельно допустимой деформации ползучести.

Условия обоснования прочности компонента формулируются согласно разделу 6.

Таблица 5.1 — Предельные состояния элемента и приводящие к ним критические события

Предельное состояние	Подпункт критического события
Кратковременное разрушение	5.3.1
Возникновение макротрещин при циклическом нагружении	5.3.4, 5.3.6
Разрушение в условиях ползучести при статическом нагружении	5.3.2
Пластическая деформация по всему сечению элемента (компонента)	5.3.3
Достижение накопленной вязкопластической деформацией предельного значения	5.3.6
Достижение предельных остаточных изменений размеров	5.3.5
Накопление предельно допустимой деформации ползучести	5.3.7

5.4 Анализ реализации критических событий должен проводиться на основании следующих уточненных поверочных расчетов.

5.4.1 Расчет на длительную статическую прочность.

5.4.2 Расчет на длительную циклическую прочность.

5.4.3 Расчет на прогрессирующее изменение размеров.

5.4.4 Расчет на накопление односторонней деформации при термоциклическом нагружении.

5.4.5 Расчет на сопротивление разрушению.

Соответствие уточненных поверочных расчетов и критических событий (см. 5.3), используемых для обоснования прочности компонента, приведено в таблице 5.1.

Таблица 5.2 — Соответствие критических событий (см. 5.3) и уточненных поверочных расчетов, используемых для обоснования прочности компонента

Подпункт критического события	Подпункт уточненного поверочного расчета
5.3.2, 5.3.7	5.4.1
5.3.4	5.4.2
5.3.5	5.4.3
5.3.6	5.4.4
5.3.1, 5.3.3	5.4.5

5.5 При проведении уточненных поверочных расчетов необходимо учитывать влияние эксплуатационных факторов (температуры, нейтронного облучения, рабочей среды, скорости деформирования, длительности нагружения) на физико-механические характеристики материалов оборудования и трубопроводов, принимаемые согласно ГОСТ Р 59115.2, ГОСТ Р 59115.3, ГОСТ Р 59115.4 и приложениям А—Д.

5.6 Уточненный поверочный расчет компонента должен быть проведен с учетом установленной расчетной последовательности режимов нагружения, основанной на анализе условий эксплуатации, регламентированных проектом АЭУ, с учетом всех расчетных нагрузок и воздействий, а также всех режимов эксплуатации. В один расчетный режим может быть включена группа режимов, если внешние нагрузки и температуры этих режимов не отличаются более, чем на 5 % от принятых расчетных значений.

5.7 Расчетные модели компонента и выбранные методы расчета должны учитывать все расчетные нагрузки и условия нагружения для требуемых расчетных режимов и обеспечивать определение всех параметров НДС (напряжений, деформаций, перемещений и т. д.), необходимых для оценки прочности в рассматриваемых критических событиях.

5.8 Для анализа критических событий следует выбирать наиболее напряженные области (зоны) оборудования и трубопроводов на основе анализа НДС и температурных полей.

6 Условия обоснования прочности компонента

6.1 Обоснование прочности компонента должно проводиться согласно проектной модели эксплуатации АЭУ при нормальной эксплуатации, нарушении нормальной эксплуатации и проектной аварии.

6.2 Условия обоснования прочности должны быть проанализированы для основного металла и для сварных швов компонента.

Примечание — Для всех сварных швов однотипных сварных соединений (выполняемых одним и тем же способом сварки материала одной группы (сочетания групп) и имеющих общие геометрические и технологические характеристики) допускается проводить анализ прочности только для самого нагруженного шва. Если среди анализируемых однотипных сварных швов есть как швы, которые при эксплуатации будут подвергаться периодическому НЭК, так и швы, которые ему подвергаться не будут, то анализ прочности необходимо проводить как для самого нагруженного контролируемого шва, так и для самого нагруженного неконтролируемого шва.

6.3 При обосновании прочности компонентов принимают, что на момент начала эксплуатации расчетный дефект отсутствует во всех компонентах, кроме сварных швов, которые при эксплуатации не будут подвергаться периодическому НЭК.

6.4 На момент начала эксплуатации в самых нагруженных неконтролируемых сварных швах каждого типа (выполненных по различным схемам разделки) должны быть постулированы расчетные дефекты с размерами, принимаемыми согласно 7.3.

6.5 Если за назначенный срок службы в компоненте, который при эксплуатации будет подвергаться периодическому НЭК, не реализуются критические события 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6, то на момент окончания рассматриваемого периода эксплуатации в этом компоненте должен быть постулирован расчетный дефект с учетом рассмотрения условий согласно ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 12). Размеры расчетного дефекта следует принимать согласно 7.2.

6.6 Прочность любого рассматриваемого компонента считается обоснованной, если для него за назначенный срок службы выполнены все следующие условия.

6.6.1 Не реализуются критические события 5.3.2, 5.3.4, 5.3.6 (включая сварные швы, которые при эксплуатации не будут подвергаться периодическому неразрушающему эксплуатационному контролю).

6.6.2 Не реализуются критические события 5.3.1 и 5.3.3 (выполняются условия прочности согласно 12.4 или 12.5) при наличии расчетного дефекта, постулируемого по 6.4, с учетом его возможного подроста по механизмам ползучести и усталости (согласно 12.2 и 12.3) за время от начала эксплуатации до момента окончания назначенного срока службы компонента.

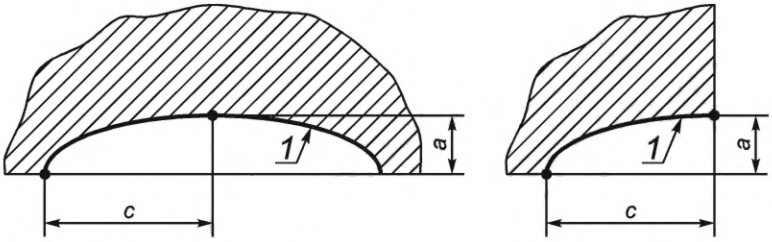
6.6.3 Не реализуются критические события 5.3.1 и 5.3.3 (выполняются условия прочности согласно 12.4 или 12.5) при наличии расчетного дефекта, постулируемого по 6.5, без учета его подроста.

Примечание — В случае, если в соответствии с ГОСТ Р 59115.9 условия прочности согласно 12.4 или 12.5 настоящего стандарта для компонента с постулируемым дефектом были выполнены, то проводить обоснование прочности согласно 6.6.3 не требуется.

6.6.4 Не реализуется критическое событие 5.3.5 (выполняется условие непревышения допустимых размеров согласно разделу 10).

7 Расчетный (постулируемый) дефект

7.1 В качестве постулируемого дефекта рассматривают расчетную трещину с заданной формой и размерами. В зависимости от геометрии компонента расчетный дефект следует принимать в виде поверхностной полуэллиптической или поверхностной угловой четвертьэллиптической трещины (см. рисунок 7.1) с соотношением полуосей $\frac{c_0}{a_0} = 3$, где a_0 и c_0 — начальные размеры.



а) Поверхностная полуэллиптическая трещина

б) Поверхностная угловая четвертьэллиптическая трещина

1 — фронт трещины

Рисунок 7.1 — Виды расчетного дефекта в компоненте

7.2 В случае если за назначенный срок службы в компоненте (в основном металле или сварном шве) не реализуется критическое событие 5.3.2, 5.3.4 или 5.3.6, то для рассмотрения условия прочности согласно 12.4 и 12.5 на конец назначенного срока службы в компоненте постулируют расчетный дефект с учетом рассмотрения условий согласно ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 12). Размер c_0 расчетного дефекта принимают согласно 7.1. Размер малой полуоси a_0 расчетного дефекта принимают в зависимости от толщины H_t компонента или свариваемых компонентов равным:

- 1 мм, при $2 \le H_t \le 4$ мм;
- 0,25 H_t, при $4 < H_t \le 8$ мм;
- 2 мм, при H_t более 8 мм.

Расчетный дефект должен быть ориентирован таким образом, чтобы отношение J/J_c (K_I/K_{JC}) было наибольшим.

7.3 При обосновании прочности согласно 6.4 расчетный дефект в сварном шве постулируют в виде поверхностной трещины.

7.3.1 Вид расчетного дефекта (полуэллиптическая или четвертьэллиптическая трещина) должен определяться геометрией сварного шва, в котором постулируют этот дефект.

7.3.2 Отношение c_0/a_0 начальных размеров большой полуоси c_0 к малой полуоси a_0 расчетного дефекта следует принимать равным 3. Начальный размер малой полуоси a_0 расчетного дефекта в направлении толщины свариваемых компонентов определяют по формуле

$$a_0 = l_0, \tag{7.1}$$

где l_0 — максимальный размер дефекта технологического происхождения (в сварном шве).

Значение l_0 принимают согласно таблице 7.1.

Таблица 7.1 — Значение l_0 для сварного шва

Толщина свариваемых компонентов, мм	l_0, мм
До 4 включ.	1
Св. 4 до 10 включ.	2
Св. 10 до 20 включ.	3
Св. 20 до 30 включ.	4
Св. 30	5

7.3.3 Расчетный дефект должен быть ориентирован таким образом, чтобы отношение J/J_c (K_I/K_{JC}) было наибольшим.

7.3.4 Конечные размеры расчетного дефекта с учетом его возможного стабильного роста определяют в соответствии с разделом 12.

8 Расчет на длительную статическую прочность

8.1 Общие положения расчета на длительную статическую прочность

8.1.1 Уточненный поверочный расчет на длительную статическую прочность следует проводить для уточненного обоснования прочности компонента по критическому событию согласно 5.3.2.

8.1.2 Расчет на длительную статическую прочность следует проводить для компонентов, максимальная температура T которых превышает T_t и периоды эксплуатации которых включают один или несколько режимов со стационарными условиями нагружения.

8.1.3 При расчете на длительную статическую прочность следует рассматривать все эксплуатационные режимы, включая нарушение нормальных условий эксплуатации.

8.1.4 Уточненный поверочный расчет следует проводить для установленной расчетной последовательности режимов нагружения с учетом физико-механических характеристик основного металла и металла сварных швов, принимаемых согласно ГОСТ Р 59115.2, ГОСТ Р 59115.3, ГОСТ Р 59115.4, приложениям А—Д настоящего стандарта.

8.1.5 Для получения уточненных значений длительного статического повреждения расчет длительной статической прочности проводят согласно 8.2.

Расчет с использованием изохронных кривых деформирования проводят при отсутствии данных по длительной прочности для условий нагружения при постоянной нагрузке по 8.3.

8.2 Расчет на длительную статическую прочность на основании напряженно-деформированного состояния, рассчитанного в вязкоупругой постановке

8.2.1 В результате данного расчета определяют уточненное значение длительного статического повреждения в локальных зонах концентрации напряжений с использованием численных методов и уравнений ползучести для определения НДС в компоненте.

8.2.2 Для периода эксплуатации компонента, характеризующегося одним или несколькими режимами нагружения, отличающимися по напряжению и/или температуре, должно выполняться условие по накопленному длительному статическому повреждению

$$D_\tau < 1, \tag{8.1}$$

где D_τ — накопленное повреждение, рассчитываемое по формуле

$$D_\tau = \sum_{i=1}^{L} \frac{\Delta t_i}{t_{f,i}}; \quad (8.2)$$

Δt_i — время нагружения компонента напряжением $\boldsymbol{\sigma}_{eq}^{i}$ в течение i-го интервала при температуре T_i (учитывается только время нагружения при температурах $T \geq T_t$);

$t_{f,i}$ — время до разрушения, определяемое при температуре T_i и $\boldsymbol{R}_c^T = (\boldsymbol{\sigma}_{eq}^{i})_{\max}$ по ГОСТ Р 59115.4;

L — количество интервалов нагружения на всем периоде эксплуатации, отличающихся температурой T_i или напряжением $\boldsymbol{\sigma}_{eq}^{i}$.

Значение $\boldsymbol{R}_c^T$ вычисляют по формуле

$$\boldsymbol{R}_c^T = \frac{\boldsymbol{R}_{mt}^T}{\left(1 - \frac{\boldsymbol{Z}_t^T}{100}\right)}, \quad (8.3)$$

где значения $\boldsymbol{R}_{mt}^T$ и $\boldsymbol{Z}_t^T$ принимают по ГОСТ Р 59115.4.

Расчет напряжения $(\boldsymbol{\sigma}_{eq}^{i})_{\max}$ проводят по 8.2.3—8.2.5.

Расчет накопленного повреждения проводят для наиболее нагруженных локальных зон компонента с концентрацией напряжений.

8.2.3 Для определения напряжения $\boldsymbol{\sigma}_{eq}^{i}$ весь период эксплуатации компонента следует рассматривать как последовательное прослеживание истории нагружения компонента во времени с временными интервалами Δt_i

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i, \quad (8.4)$$

где t_i, t_{i+1} — текущий и последующий моменты времени соответственно;

$i = 1, 2, \ldots, L$.

Примечание — Для повышения точности и уменьшения консервативности расчетов рекомендуется уменьшать величину временного интервала Δt_i. При увеличении Δt_i расчетное значение повреждения увеличивается и расчет повреждений становится более консервативным.

8.2.4 На каждом временном интервале Δt_i следует определить изменение напряжений во времени с использованием расчета в вязкоупругой постановке с учетом истории нагружения на временном интервале от 0 до t_{i+1}.

Уравнения, используемые при определении НДС в компоненте, приведены в Е.2 и Е.4 приложения Е.

Примечание — На каждом временном интервале Δt_i значения кратковременных и длительных механических свойств следует принимать постоянными и определенными в соответствии с температурой и повреждающей дозой на момент времени t_i (начало временного интервала Δt_i).

8.2.5 Для установленной последовательности режимов нагружения по результатам расчета следует сформировать зависимость интенсивности напряжения σ_{eq} во времени с учетом изменения максимального главного напряжения σ_1 и температуры T (см. рисунок 8.1).

При определении зависимости $\sigma_{eq}(t)$ исключают временные интервалы с $\sigma_1 < 0$ и $T \leq T_t$. При этом значение интенсивности напряжения принимают постоянным и равным максимальному значению $\sigma_{eq}(t)$ на временном интервале Δt_i: $(\boldsymbol{\sigma}_{eq}^{i})_{\max} = \max(\sigma_{eq}(\Delta t_i))$.

8.2.6 Значения $t_{f,i}$ определяют при максимальных значениях температуры $T_i = \boldsymbol{T}_{\max}^{i}$ на временном интервале Δt_i.

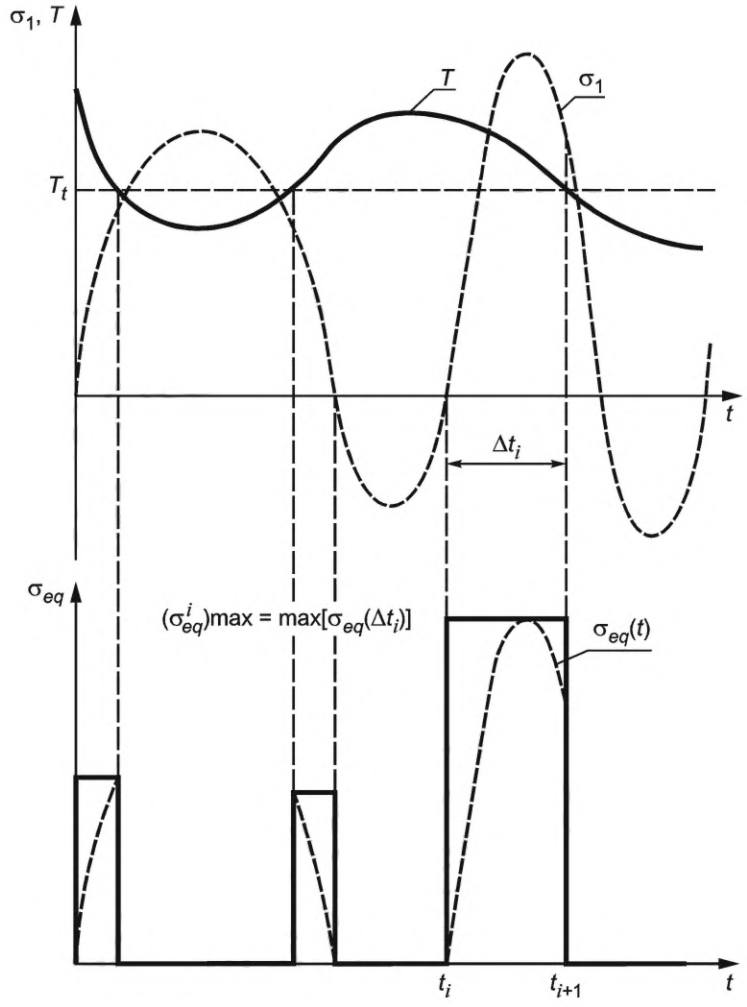


Рисунок 8.1 — Формирование зависимости $(\sigma_{eq})_{max}$ во времени с учетом изменения максимального главного напряжения σ_1 и температуры T

8.2.7 Для зон компонента с остаточными сварочными напряжениями накопленное повреждение D_τ следует определять по формуле

$$D_\tau = \sum_{i=1}^{L} \frac{D_{\tau i} \cdot \varepsilon_{ft}^{T}(\xi_i)}{\left(\varepsilon_{ft}^{T}(\xi_i) - \varepsilon_{\text{ОСН}}^{p}\right)}, \tag{8.5}$$

где $\varepsilon_{ft}^{T}(\xi_i)$ — зависимость деформации разрушения при ползучести от средней скорости деформирования ξ_i на временном интервале Δt_i;

$\varepsilon_{\text{ОСН}}^{p}$ — максимальная пластическая деформация после сварки, обуславливающая остаточные сварочные напряжения; допускают принимать $\varepsilon_{\text{ОСН}}^{p} = 0{,}002$.

Зависимость $\varepsilon_{ft}^{T}(\xi_i)$ строят посредством перестроения зависимости $\varepsilon_{ft}^{T}(t_f)$, где вместо координаты t_f используют координату $\xi = \frac{\varepsilon_{ft}^{T}}{t_f}$. Значения ε_{ft}^{T} и t_f принимают согласно ГОСТ Р 59115.4—2021 (раздел 5, приложение А).

8.3 Расчет на длительную статическую прочность с использованием изохронных кривых деформирования

8.3.1 Расчет с использованием изохронных кривых деформирования проводят при отсутствии данных по длительной прочности для условий нагружения при постоянной нагрузке по критическому событию согласно 5.3.7.

Расчет проводят для наиболее нагруженной области (зоны) компонента для времени, соответствующего концу срока службы.

Для зон без концентрации напряжений проводят расчет в упругой постановке согласно 8.3.2 и 8.3.3. Для зон концентрации напряжений проводят расчет в упругопластической постановке согласно 8.3.4.

8.3.2 На основании расчета в упругой постановке определяют значения общих мембранных σ_m и изгибных σ_b напряжений согласно ГОСТ Р 59115.9.

8.3.3 Для заданного срока службы и температуры по изохронной кривой определяют деформацию ползучести ε_c, соответствующую напряжению $\sigma = \sigma_m + \sigma_b/1{,}15$, где σ_b — максимальное изгибное напряжение.

Прочность компонента считается обеспеченной, если выполняется условие

$$\varepsilon_c \le k \cdot \varepsilon_{ft}, \tag{8.6}$$

где

$$\varepsilon_{ft} = 0{,}1 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{ft}^{T}, \tag{8.7}$$

$\boldsymbol{\varepsilon}_{ft}^{T}$ — деформация разрушения при ползучести (длительная пластичность).

Коэффициент k в условии (8.6) принимают равным:

- для основного металла $k = 1$;
- для металла шва $k = 0{,}5$.

Если информация по длительной пластичности отсутствует, то принимают $\varepsilon_{ft} = 0{,}01$.

8.3.4 Для зоны концентрации напряжений на основании расчета в упругопластической постановке, в котором в качестве кривых деформирования используются изохронные кривые для времени, соответствующего концу срока службы, следует определять максимальное значение интенсивности пластических деформаций $\boldsymbol{\varepsilon}_{eq}^{P}$.

Прочность компонента считается обеспеченной, если выполняется условие

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{eq}^{P} \le k \cdot \varepsilon_{ft}, \tag{8.8}$$

где

$$\varepsilon_{ft} = 0{,}5 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{ft}^{T}. \tag{8.9}$$

Если информация по длительной пластичности отсутствует, то принимают $\boldsymbol{\varepsilon}_{ft}^{T} = 0{,}05$.

8.3.5 Для расчета по 8.3.3 и 8.3.4 используют изохронные кривые деформирования в соответствии с ГОСТ Р 59115.4—2021 (приложение Б), значения $\boldsymbol{\varepsilon}_{ft}^{T}$ принимают в соответствии с ГОСТ Р 59115.4—2021 (раздел 5).

9 Расчет на длительную циклическую прочность

9.1 Условие прочности компонента при длительном циклическом нагружении

9.1.1 Расчет на длительную циклическую прочность следует проводить для уточненного обоснования прочности компонента по критическому событию согласно 5.3.4.

9.1.2 Расчет на длительную циклическую прочность следует проводить для наиболее нагруженных локальных зон компонента, в которых максимальная температура T превышает T_t, с учетом повреждения, рассчитанного для режимов, протекающих при температуре эксплуатации T, не превышающей T_t.

9.1.3 Компонент, рассчитываемый на длительную циклическую прочность, должен удовлетворять условиям прочности с учетом результатов расчета на длительную статическую прочность.

9.1.4 Расчет на длительную циклическую прочность компонента следует проводить для установленной последовательности режимов нагружения, основанной на анализе условий эксплуатации, регламентированных проектом, с учетом физико-механических характеристик основного металла и металла сварных швов.

9.1.5 Расчет уточненного значения длительного циклического повреждения следует проводить с использованием диаграммы, приведенной на рисунке 9.1

В соответствии с диаграммой прочность компонента, рассчитываемого на длительную циклическую прочность, будет обеспечена, если точка, определяемая значениями повреждений D_N и D_τ, лежит внутри области, ограниченной осями $0D_\tau$, $0D_N$ и кривой $f_C(D_N, D_\tau)$.

На рисунке 9.1 используются следующие обозначения:

- D_τ — повреждение при длительном статическом нагружении, вычисленное согласно 8.2;
- D_N — усталостное повреждение при циклическом нагружении, вычисленное согласно 9.2;
- $f_C(D_N, D_\tau)$ — зависимость, описывающая совокупность пар значений D_N и D_τ, приводящих к критическому повреждению.

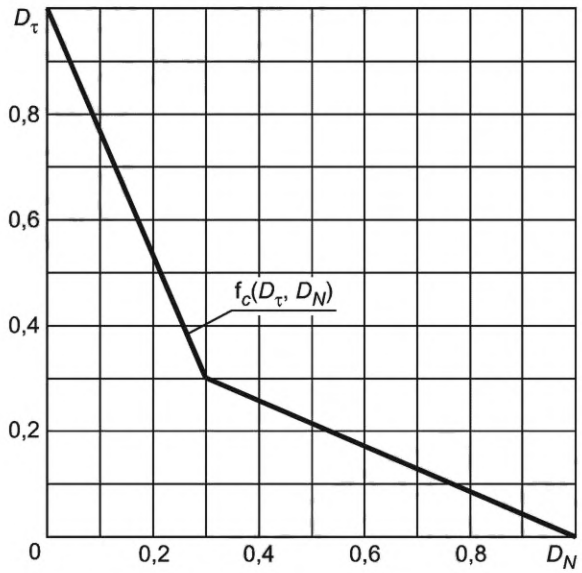


Рисунок 9.1 — Диаграмма, описывающая условие прочности при длительном циклическом и длительном статическом нагружениях

9.1.6 Диаграмма, приведенная на рисунке 9.1, применима для хромоникелевых сталей аустенитного класса и металла их сварных швов, высокохромистых сталей 10Х9МФБ, 10Х9МФБ-Ш, 10Х9МФБ-ВД, 7Х12НМФБ и металла их сварных швов.

Использование данной диаграммы для сталей других классов требует ее обоснования.

9.2 Расчет повреждения при длительном циклическом нагружении

9.2.1 Расчет усталостного повреждения D_N проводят с использованием расчетных кривых усталости и процедуры формирования циклов нагружения, в результате которой определяют размахи деформаций и количество полуциклов за рассматриваемый период эксплуатации согласно приложению Ж.

При определении размахов деформаций следует рассмотреть изменение деформаций во времени в наиболее нагруженной локальной зоне компонента с концентрацией напряжений для установленной последовательности режимов нагружения.

9.2.2 Расчет усталостного повреждения при $T > T_t$ проводят на основе расчета в упруго-вязкопластической постановке с использованием уравнений ползучести согласно Е.4 (приложение Е), пластического деформирования идеального упругопластического тела согласно Е.2 и Е.3.2 (приложение Е) и кривых усталости, рассчитанных согласно И.2 (приложение И).

9.2.3 Расчет усталостного повреждения при $T \le T_t$ проводят на основе расчета в упругопластической постановке с использованием уравнений согласно Е.2 и Е.3.1 (приложение Е) и кривых усталости, рассчитанных согласно И.3 (приложение И).

9.2.4 Расчет следует проводить с учетом изменения физико-механических характеристик материалов под воздействием температуры и нейтронного облучения. По результатам расчета строят профиль циклического нагружения (т. е. зависимость деформации $\varepsilon^{(n)}$ от номера шага нагружения) согласно Ж.1 (приложение Ж) и формируют последовательность циклов нагружения с определением количества циклов, размахов деформаций $\Delta\varepsilon$ и скоростей деформирования в полуцикле ξ согласно Ж.2 (приложение Ж).

9.2.5 Для расчета усталостного повреждения весь период эксплуатации разбивают на временные интервалы Δt_j, где $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$, $j = 1, 2, \ldots, M$; M — количество режимов нагружения (блоков нагружения) на рассматриваемом периоде эксплуатации.

Примечание — Для снижения консерватизма расчет следует проводить с большим количеством временных интервалов L. Величина Δt_j должна выбираться таким образом, чтобы температурные и силовые характеристики нагружения в начале и в конце интервала были приблизительно одинаковыми. При уменьшении количества временных интервалов L расчетное значение усталостного повреждения будет увеличиваться, и расчет повреждений будет более консервативным.

9.2.6 На каждом временном интервале Δt_j свойства материалов компонент, характеризующие сопротивление усталостному разрушению (кривые усталости), следует рассчитывать в соответствии с приложением И для повреждающей дозы нейтронного облучения F_{j+1}, которая соответствует моменту времени t_{j+1} (моменту окончания временного интервала Δt_j).

9.2.7 Усталостное повреждение D_N^j на временном интервале Δt_j для наиболее нагруженных зон компонента с концентрацией напряжений рассчитывают согласно Ж.3.6 (приложение Ж) по формуле

$$D_N = 0{,}5 k_D \sum_{n=1}^{L} \frac{1}{[N_{f,n}]}, \tag{9.1}$$

где $[N_{f,n}]$ — допускаемое количество циклов при размахе деформаций $\Delta\varepsilon_n$ и скорости деформирования в полуцикле ξ_n;

L — количество полуциклов нагружения на временном интервале Δt_j, определяемое в соответствии с Ж.3 (приложение Ж);

k_D — коэффициент, рассчитываемый согласно Ж.3.5 (приложение Ж).

Значение $[N_{f,n}]$ определяют по расчетным кривым усталости в соответствии с И.2 (приложение И) при $T > T_t$ с использованием значений $\Delta\varepsilon_n$ и ξ_n, и в соответствии с И.3 (приложение И) при $T \le T_t$ с использованием значений $\Delta\varepsilon_n$.

Значения $\Delta\varepsilon_n$ и ξ_n рассчитывают согласно Ж.3.7 и Ж.3.8 (приложение Ж) соответственно.

Значения характеристик, используемых для расчета кривых усталости, следует принимать в соответствии со скоростью деформирования в полуцикле и температурой T, соответствующей максимальной температуре в полуцикле нагружения.

9.2.8 Накопленное усталостное повреждение за весь период эксплуатации следует определять по формуле

$$D_N = \sum_{j=1}^{M} D_N^j. \tag{9.2}$$

9.2.9 При расчете на длительную циклическую прочность необлучаемых компонентов допускают использовать экспериментальные кривые усталости, полученные в соответствии с требованиями метода испытаний на усталость по ГОСТ Р 59115.5.

10 Расчет на прогрессирующее изменение размеров

10.1 Расчет на прогрессирующее изменение размеров проводят для обоснования прочности компонента по критическому событию согласно 5.3.5 при условии ограничения остаточных изменений размеров заданными размерами.

10.2 Расчет на прогрессирующее изменение размеров с учетом ползучести следует проводить для компонентов, максимальная температура T которых превышает T_t.

10.3 При проведении расчета на прогрессирующее изменение размеров следует рассматривать нормальные условия эксплуатации и нарушение нормальных условий эксплуатации.

10.4 Расчет на прогрессирующее изменение размеров следует проводить для установленной последовательности режимов нагружения с учетом изменения физико-механических характеристик основного металла и металла сварных швов в результате воздействия температуры.

10.5 Для определения изменения размеров компонента следует выполнить расчет в упруго-вязкопластической постановке с использованием временных интервалов $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, где $i = 1, 2, \ldots, L$; L — количество временных интервалов, сформированных для описания процесса нагружения на всем периоде эксплуатации.

Уравнения, используемые для проведения расчета, приведены в приложении Е.

Примечания

1 Для повышения точности и уменьшения консервативности расчетов рекомендуется уменьшать величину временного интервала Δt_i.

2 На каждом временном интервале Δt_i значения кратковременных и длительных механических свойств следует принимать постоянными и определенными в соответствии с температурой и повреждающей дозой на момент времени t_{i+1} (конец временного интервала Δt_i).

10.6 Прочность компонента, рассчитываемого на прогрессирующее изменение размеров, обеспечена, если выполнено условие

$$\Delta H_k < [\Delta H]_k, \tag{10.1}$$

где ΔH_k — изменение геометрических размеров компонента в k-м направлении на конец эксплуатации;

$[\Delta H]_k$ — допускаемое изменение размера компонента в k-м направлении.

Значение $[\Delta H]_k$ устанавливается конструкторской документацией.

11 Расчет на одностороннее накопление вязкопластических деформаций при термоциклическом нагружении

11.1 Общие положения

11.1.1 Накопление вязкопластических деформаций возможно под действием внутреннего давления и термоциклического нагружения (за счет циклического радиального перепада температур) в стенке сосуда или трубопровода.

11.1.2 Расчет на одностороннее накопление вязкопластических деформаций при циклическом нагружении должен проводиться для обоснования прочности компонента по критическому событию 5.3.6.

11.1.3 Расчет на накопление вязкопластических деформаций следует проводить для компонентов, в которых максимальная температура T превышает T_t, в условиях термоциклического нагружения.

11.1.4 Расчет на накопление вязкопластических деформаций следует проводить для наиболее нагруженных областей компонента и установленной последовательности режимов нагружения с учетом изменения физико-механических характеристик основного металла и металла сварных швов в результате воздействия температуры.

11.1.5 Допускают не проводить расчет на накопление вязкопластических деформаций, если выполнено любое из условий по ГОСТ Р 59115.9—2021 (пункты 13.2 и 13.3).

11.2 Оценка прочности по критерию одностороннего накопления вязкоупругих деформаций

11.2.1 Расчет проводят с использованием диаграммы Бри, приведенной на рисунке 11.1, и эффективного напряжения $\sigma_{эфф}$, учитывающего механические и температурные нагрузки.

Расчет применим при $\sigma_{эфф} < R_{p0,2}^{T_{high}}$, где $R_{p0,2}^{T_{high}}$ — значение $R_{p0,2}^{T}$ при среднеинтегральной по толщине стенки температуре T_m максимальной в цикле.

11.2.2 Параметр Z (см. рисунок 11.1) следует определять по следующим формулам:

- для области E: $Z = X \cdot Y$;
- для области S_1: $Z = Y + 2\sqrt{(1 - X)/Y}$;
- для области S_2: $Z = X$,

где X и Y значения координат на диаграмме, изображенной на рисунке 11.1.

Значения X и Y вычисляют по формулам:

$$X = \frac{\sigma_m + \sigma_b / K_t}{R_{p0,2}^{avg}}; \tag{11.1}$$

$$Y = \frac{\sigma_{km}}{R_{p0,2}^{avg}}, \tag{11.2}$$

где $R_{p0,2}^{avg} = 0,5\left(R_{p0,2}^{T_{low}} + R_{p0,2}^{T_{high}}\right)$;

$K_t = 0,5(K + 1)$;

$R_{p0,2}^{T_{low}}$ — значение $R_{p0,2}^{T}$ при минимальной среднеинтегральной температуре стенки в цикле;

σ_{km} — общие мембранные напряжения компенсации, вызванные циклическими изменениями температуры в стенке сосуда или трубопровода.

Значение K принимают равным 1,5 в случае местного изгиба оболочек, и 1,3 для обечаек и трубопроводов в случае общего изгиба.

Формулы (11.1) и (11.2) используют при $Z \le 1$. Если величина $Z > 1$, необходимо изменить конструкцию и/или условия нагружения, или использовать уточненный расчет по 11.3.

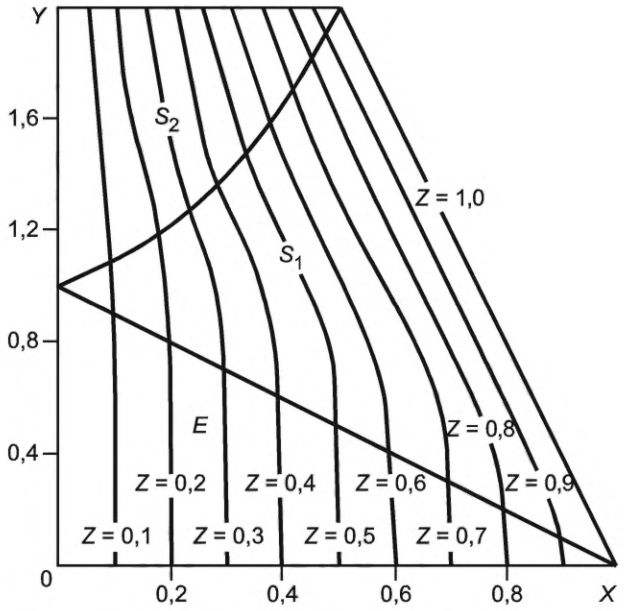


Рисунок 11.1 — Диаграмма Бри для вычисления эффективного напряжения $\sigma_{эфф}$

11.2.3 Напряжение $\sigma_{эфф}$ следует рассчитывать по формуле

$$\sigma_{эфф} = ZR_{p0,2}^{T_{low}}. \quad (11.3)$$

11.2.4 Для температуры стенки T_m и длительности цикла нагружения по изохронной кривой деформирования (см. ГОСТ Р 59115.4) определяют среднюю по сечению деформацию ползучести ε_c, соответствующую напряжению $1,25 \cdot \sigma_{эфф}$.

Если значение ε_c меньше 0,002 на каждом цикле нагружения, то прочность компонента обеспечена и дальнейшие расчеты не проводят.

Если значение $\varepsilon_c \ge 0,002$, то определяют суммарные деформации ползучести, вычисленные по всем циклам

$$\varepsilon_{c\sum} = \sum\varepsilon_c. \quad (11.4)$$

Суммарная деформация должна удовлетворять условиям:

- для основного металла

$$\varepsilon_{c\sum} < 0,02; \quad (11.5)$$

- для металла шва

$$\varepsilon_{c\sum} < 0,01. \quad (11.6)$$

Если условия (11.5) и (11.6) не выполнены или $\sigma_{эфф} \ge R_{p0,2}^{T_{high}}$, следует выполнить уточненный расчет по 11.3.

11.3 Уточненный расчет на одностороннее накопление вязкопластических деформаций

11.3.1 Уточненный расчет проводится для наиболее нагруженных локальных зон компонента с концентрацией напряжений.

11.3.2 Для определения одностороннего накопления деформаций весь период эксплуатации компонента следует рассматривать как последовательное прослеживание истории нагружения компонента во времени с временны́ми интервалами Δt_k

$$\Delta t_k = t_{k+1} - t_k, \tag{11.7}$$

где t_k, t_{k+1} — текущий и последующий моменты времени соответственно;

$k = 1, 2, \ldots, L$; L — количество временных интервалов на всем периоде эксплуатации.

Примечания

1 Для повышения точности и уменьшения консервативности расчетов рекомендуется уменьшать величину временно́го интервала Δt_k. При этом значение Δt_k следует выбирать таким образом, чтобы температурные и силовые характеристики цикла нагружения в начале (момент времени t_k) и в конце интервала (момент времени t_{k+1}) были приблизительно одинаковыми.

2 На каждом временно́м интервале Δt_k значения кратковременных и длительных механических свойств следует принимать постоянными и определенными в соответствии с температурой на момент времени t_k (начало временно́го интервала Δt_k).

11.3.3 На каждом временно́м интервале Δt_k следует определить изменение деформаций во времени с использованием расчета в упругопластической постановке, если температура T расчетной зоны не превышает T_t, или расчета в упруго-вязкопластической постановке, если температура T выше T_t.

Уравнения, используемые для расчета НДС, приведены в приложении Е. При проведении расчета в упругопластической постановке используют уравнения согласно Е.2 и Е.3.1 (приложение Е). При проведении расчета в упруго-вязкопластической постановке используют уравнения ползучести согласно Е.4 (приложение Е) и уравнения пластического деформирования идеального упругопластического тела согласно Е.2 и Е.3.2 (приложение Е).

11.3.4 По результатам расчетов следует определить накопленное повреждение для наиболее нагруженных локальных зон компонента с концентрацией напряжений по формуле

$$D_\varepsilon = \sum_{k=1}^{K} \frac{(\Delta\varepsilon_{eq}^{pc})_k}{\varepsilon_{f,k}}, \tag{11.8}$$

где K — количество временны́х интервалов Δt_k на всем периоде эксплуатации;

$(\Delta\varepsilon_{eq}^{pc})_k$ — интенсивность приращения вязкопластической деформации на временно́м интервале Δt_k (см. рисунок 11.2);

$\varepsilon_{f,k}$ — деформация разрушения на временно́м интервале Δt_k,

$$\varepsilon_{f,k} = \begin{cases} \varepsilon_f, \text{ если } T < T_t \text{ на временно́м интервале } \Delta t_k \\ \varepsilon_f^T(\xi_k), \text{ если } T \geq T_t \text{ на временно́м интервале } \Delta t_k \end{cases}; \tag{11.9}$$

ξ_k — скорость деформирования на временно́м интервале Δt_k.

Величину $(\Delta\varepsilon_{eq}^{pc})_k$ определяют по формулам:

- при $\geq T_t$ на временно́м интервале Δt_k

$$(\Delta\varepsilon_{eq}^{pc})_k = \sqrt{\frac{2}{3}(\Delta\varepsilon_{ij}^{pc})_k(\Delta\varepsilon_{ij}^{pc})_k}; \tag{11.10}$$

- при $T < T_t$ на временно́м интервале Δt_k

$$(\Delta\varepsilon_{eq}^{pc})_k \equiv (\Delta\varepsilon_{eq}^{p})_k = \sqrt{\frac{2}{3}(\Delta\varepsilon_{ij}^{p})_k(\Delta\varepsilon_{ij}^{p})_k}, \tag{11.11}$$

где $(\Delta\varepsilon_{eq}^{p})_k$ — интенсивность приращения пластической деформации на временно́м интервале Δt_k;

$$(\Delta\varepsilon_{ij}^{pc})_k = (\Delta\varepsilon_{ij}^{p})_k + (\Delta\varepsilon_{ij}^{c})_k; \tag{11.12}$$

$$(\Delta\varepsilon_{ij}^{p})_k = (\varepsilon_{ij}^{p})_{k+1} - (\varepsilon_{ij}^{p})_k; \tag{11.13}$$

$$(\Delta\varepsilon_{ij}^{c})_k = (\varepsilon_{ij}^{c})_{k+1} - (\varepsilon_{ij}^{c})_k; \quad (11.14)$$

$(\varepsilon_{ij}^{p})_k$, $(\varepsilon_{ij}^{p})_{k+1}$ — значения компонент пластических деформаций в момент времени t_k и t_{k+1} соответственно;

$(\varepsilon_{ij}^{c})_k$, $(\varepsilon_{ij}^{c})_{k+1}$ — компоненты деформаций ползучести в момент времени t_k и t_{k+1} соответственно.

Величину ξ_k определяют по формуле

$$\xi_k \equiv \frac{(\Delta\varepsilon_{eq}^{pc})_k^*}{\Delta t_k} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}(\Delta\varepsilon_{ij}^{pc})_k^*(\Delta\varepsilon_{ij}^{pc})_k^*}}{\Delta t_k}, \quad (11.15)$$

где $(\Delta\varepsilon_{ij}^{pc})_k^* = (\varepsilon_{ij}^{pc})_k^{max} - (\varepsilon_{ij}^{pc})_k$;

$(\varepsilon_{ij}^{pc})_k$ — компоненты вязкопластических деформаций в момент времени t_k;

$(\varepsilon_{ij}^{pc})_k^{max}$ — компоненты вязкопластических деформаций, когда интенсивность вязкопластической деформации ε_{eq}^{pc} достигает максимального значения на временно́м интервале Δt_k (см. рисунок 11.2);

$$\varepsilon_{eq}^{pc} = \sqrt{\frac{2}{3}\varepsilon_{ij}^{pc}\varepsilon_{ij}^{pc}}; \quad (11.16)$$

$$\varepsilon_{ij}^{pc} = \varepsilon_{ij}^{p} + \varepsilon_{ij}^{c}. \quad (11.17)$$

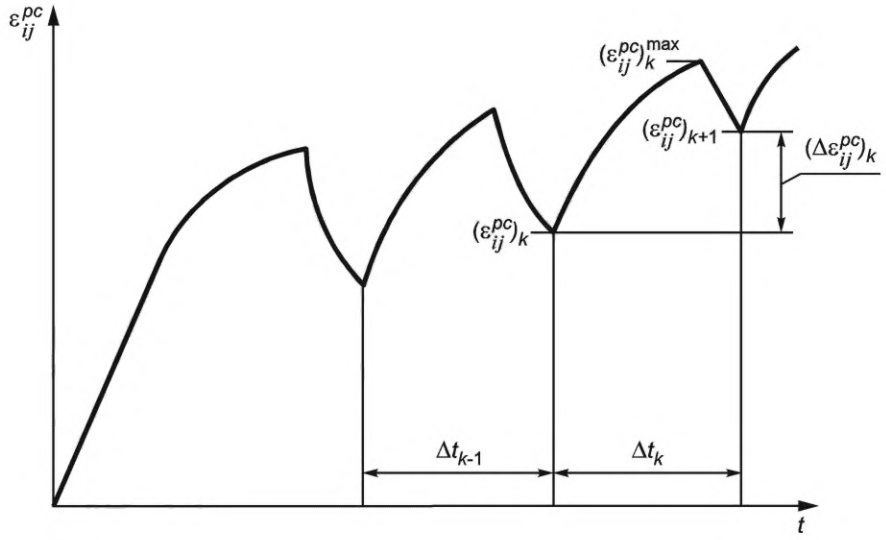


Рисунок 11.2 — Схема определения приращения вязкопластической деформации $\Delta\varepsilon_{ij}^{pc}$ на временно́м интервале Δt_k

Значение ε_f принимают по приложению А или рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_f = -\ln\left(1 - \frac{Z^T}{100}\right), \quad (11.18)$$

где Z^T принимают согласно приложению А и ГОСТ Р 59115.3.

Зависимость $\varepsilon_{ft}^{T}(\xi)$ строят посредством перестроения зависимости $\varepsilon_{ft}^{T}(t_f)$, где вместо координаты t_f используют координату $\xi = \frac{\varepsilon_{ft}^{T}}{t_f}$. Значения ε_{ft}^{T} и t_f принимают согласно ГОСТ Р 59115.4.

11.3.5 Допускают определять накопленное повреждение для первых нескольких циклов нагружения, если величина $\Delta\varepsilon_{eq}^{pc}$ устанавливается через 3—4 цикла. По результатам расчета вычисляют среднее значение повреждения за цикл нагружения путем суммирования повреждения за n циклов (3 или 4 цикла) и деления на количество этих циклов. Суммарное повреждение определяют путем умножения среднего повреждения на общее количество циклов нагружения в течение всего времени эксплуатации.

11.3.6 Прочность компонента обеспечена, если выполнено условие

$$D_{\varepsilon} < 1. \qquad (11.19)$$

Если на конец периода эксплуатации повреждаемость $D_{\varepsilon} > 1$, то следует определить момент времени зарождения трещины $t_f^{\text{зарожд}}$, при котором $D_{\varepsilon} = 1$.

12 Расчет на сопротивление разрушению

12.1 Общие положения

12.1.1 Расчет на сопротивление разрушению следует проводить для обоснования прочности компонента по критическим событиям 5.3.1 и 5.3.3 с использованием положений раздела 6.

12.1.2 Расчет на сопротивление разрушению проводят во всем диапазоне температур эксплуатации компонента.

Для компонентов, в которых максимальная температура T превышает T_t, расчеты следует проводить с учетом ползучести согласно 12.2—12.4.

Для компонентов, в которых максимальная температура T не превышает T_t, расчеты следует проводить без учета ползучести согласно 12.3 и 12.4.

12.1.3 Расчет на сопротивление разрушению следует проводить для установленной последовательности режимов нагружения с учетом физико-механических характеристик материала.

12.1.4 В рамках расчета на сопротивление разрушению следует рассмотреть развитие расчетного дефекта в сварном шве, не подвергаемом эксплуатационному контролю, начиная с момента начала эксплуатации.

Трещину во всех случаях следует ориентировать таким образом, чтобы ее рост был максимальным (отношение J/J_c (K_I/K_{JC}) было наибольшим).

12.1.5 Для анализа развития трещины весь период эксплуатации компонента следует рассматривать как последовательное прослеживание истории нагружения компонента во времени с временными интервалами Δt_i

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i\,, \qquad (12.1)$$

где t_i, t_{i+1} — текущий и последующий моменты времени соответственно;

$i = 1, 2, \ldots, L$; L — количество временных интервалов на всем периоде эксплуатации.

Примечания

1 Для повышения точности и уменьшения консервативности расчетов рекомендуется уменьшать величину временного интервала Δt_i.

2 На каждом временном интервале Δt_i значения кратковременных и длительных механических свойств следует принимать постоянными и определенными в соответствии с температурой на момент времени t_i (начало временного интервала Δt_i).

12.1.6 Анализ развития трещины при длительном нагружении по механизму ползучести следует выполнять на основе расчета в упруго-вязкопластической постановке с использованием уравнений ползучести согласно Е.4 (приложение Е) и уравнений пластического деформирования идеального упругопластического тела согласно Е.2 и Е.3.2 (приложение Е).

Анализ развития трещины при циклическом нагружении по механизму усталости рекомендуется выполнять на основе расчета в упругой постановке с использованием параметров линейной механики разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений). Уравнения, используемые для определения НДС, приведены в Е.2 (приложение Е).

Примечание — При расчете в упругой постановке следует вводить начальные деформации, равные неупругим деформациям, полученным из расчета в упруго-вязкопластической постановке. Допускают не учитывать начальные деформации, если при анализе скорости роста усталостной трещины коэффициент асимметрии нагружения принимается равным 0,95.

12.2 Расчет развития трещины при длительном нагружении по механизму ползучести

12.2.1 По результатам расчета в упруго-вязкопластической постановке следует построить зависимость референсного напряжения во времени $\sigma_{ref}(t)$. Расчет σ_{ref} приведен в приложении М.

12.2.2 Для установленной последовательности режимов нагружения следует сформировать временные интервалы $\Delta t_j = t_{j+1} - t_j$, где $j = 1, 2,\ldots, N_\tau$; N_τ — количество временных интервалов, на которых значения σ_{ref} принимают постоянными и равными своему максимальному значению на интервале Δt_j. При этом исключают временные интервалы, при которых температура T зоны с трещиной меньше T_t.

Примечание — Для повышения точности и уменьшения консервативности расчетов рекомендуется уменьшать величину временного интервала Δt_j.

12.2.3 Для временного интервала Δt_j следует вычислить значения КИН в точках *a* и *c* трещины (см. рисунок 7.1). При этом начальные значения размеров трещины принимают согласно 7.3.

Значения КИН принимают постоянными и равными своим значениям в момент времени *t*, при котором σ_{ref} достигает максимального значения на интервале Δt_j.

Примечания

1 Расчет КИН рекомендуется проводить методом МВФ с использованием распределения нормальных напряжений σ_n к плоскости трещины.

2 Если в компоненте рассматривается зона с остаточными сварочными напряжениями $\sigma_{ОСН}$, то для этой зоны при расчете КИН вместо σ_n используется величина $\sigma_n + \sigma_{ОСН}$, где $\sigma_{осн} = \left[(\sigma_{0,2})^{1-n_c} - E^T \cdot \frac{a_c}{(\sigma_0)^{n_c}} \cdot t_j \cdot (1-n_c)\right]^{\frac{1}{1-n_c}}$; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала в исходном (необлученном) состоянии; E^T — модуль упругости; a_c, n_c, σ_0 — параметры уравнения установившейся ползучести, определяемые в соответствии с Е.6 (приложение Е). Для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 и 07Х12НМФБ значения a_c и n_c приведены в таблице Д.1 (приложение Д).

12.2.4 Приращения размеров трещины на временном интервале Δt_j следует определять с использованием зависимостей приложения Г по формулам:

$$\Delta a_j = A_r(C_a^*)^{n_r} \cdot \Delta t_j, \text{ мм}, \tag{12.2}$$

$$\Delta c_j = A_r(C_c^*)^{n_r} \cdot \Delta t_j, \text{ мм}, \tag{12.3}$$

где A_r, n_r — константы;

C_a^*, C_c^* — C^*-интеграл в точках *a* и *c* трещины (см. рисунок 7.1), вычисляемый с использованием зависимости (Г.3) (приложение Г), по формулам:

$$C_a^* = \begin{cases} 10^{-3} \cdot (K_{(a)})^2 \cdot \dfrac{\xi_{ref}^j}{\sigma_{ref}^j}, \text{ если } T_{max}^j \geq T_t \\ 0, \text{ если } T_{max}^j < T_t \end{cases}; \tag{12.4}$$

$$C_c^* = \begin{cases} 10^{-3} \cdot (K_{(c)})^2 \cdot \dfrac{\xi_{ref}^j}{\sigma_{ref}^j}, \text{ если } T_{max}^j \geq T_t \\ 0, \text{ если } T_{max}^j < T_t \end{cases}, \tag{12.5}$$

где ξ_{ref}^j — интенсивность скорости деформации ползучести необлученного материала при $\sigma_{ref} = \sigma_{ref}^j$ и температуре, равной максимальной T_{max}^j на временном интервале Δt_j в зоне с трещиной;

$K_{(a)}$, $K_{(c)}$ — КИН в точках *a* и *c* трещины в момент времени, при котором σ_{ref} достигает максимального значения на интервале Δt_j соответственно.

Расчет σ_{ref} проводят в соответствии с приложением К с учетом размеров трещины.

Значения A_r и n_r приведены в таблице Г.1 (приложение Г), или принимаются на основе данных, приведенных в обосновывающих отчетах по материалам, и по техническим решениям, согласованным с ГМО.

Расчет ξ_{ref} проводят по формулам приложения Г с использованием формул приложения Д.

12.2.5 Текущие размеры трещины следует определять по формулам:

$$a_j = a_{j-1} + \Delta a_j; \tag{12.6}$$

$$c_j = c_{j-1} + \Delta c_j. \quad (12.7)$$

12.2.6 Конечные размеры a_τ и c_τ трещины при длительном нагружении при ползучести следует определять последовательным повторением расчета по 12.2.3—12.2.5 до достижения конца последовательности режимов нагружения.

12.3 Расчет развития трещины при циклическом нагружении

12.3.1 Для анализа развития трещины при циклическом нагружении следует определить размахи КИН на основании расчета в упругой постановке. При этом если расчет выполняется для компонента, в котором максимальная температура T превышает T_t, то расчет проводят с использованием начальных деформаций, полученных на этапе расчета в упруго-вязкопластической постановке при расчете роста трещины по механизму ползучести.

Примечание — Допускают проводить анализ развития трещины без учета начальных деформаций, полученных на этапе расчета в упруго-вязкопластической постановке. В этом случае скорость роста трещины при циклическом нагружении следует проводить при коэффициенте асимметрии цикла, равном 0,95.

12.3.2 Начальные значения размеров трещины принимают равными размерам a_τ и c_τ, полученным согласно 12.2, если проводился расчет с учетом развития трещины при ползучести, или принимают согласно 7.3, если расчет проводится для компонентов, в которых максимальная температура T равна или ниже T_t.

Циклы нагружения должны быть определены таким образом, чтобы в начале цикла и в конце цикла значения КИН были приблизительно одинаковыми.

Размах КИН определяют в точках a и c трещины (см. рисунок 7.1) на основании максимальных и минимальных значений КИН в цикле при последовательном прослеживании истории нагружения.

Примечание — Размах КИН может быть определен непосредственно из расчета в упругой постановке или с помощью метода МВФ с использованием распределения нормальных напряжений σ_n к плоскости трещины, рассчитанных при ее отсутствии.

12.3.3 Приращение размеров трещины за цикл нагружения следует определять с использованием зависимостей (В.1) и (В.4) (приложение В) по формулам:

$$\Delta a_k = \begin{cases} \omega^{\text{стар}} \cdot C_f \left(\dfrac{\Delta K_{(a)}}{\sqrt[4]{1 - R_a}} \right)^{n_f}, \text{ если } \Delta K_{(a)} \geq \Delta K_{(th)}(R_a, T) \\ 0, \text{ если } \Delta K_{(a)} < \Delta K_{(th)} \end{cases}, \text{мм}; \quad (12.8)$$

$$\Delta c_k = \begin{cases} \omega^{\text{стар}} \cdot C_f \left(\dfrac{\Delta K_{(c)}}{\sqrt[4]{1 - R_c}} \right)^{n_f}, \text{ если } \Delta K_{(c)} \geq \Delta K_{(th)}(R_c, T) \\ 0, \text{ если } \Delta K_{(c)} < \Delta K_{(th)} \end{cases}, \text{мм}, \quad (12.9)$$

где Δa_k и Δc_k — приращения размеров трещины за k-й цикл нагружения в точках a и c соответственно;

$\Delta K_{(a)}$, $\Delta K_{(c)}$ — размахи КИН на k-м цикле нагружения в точках a и c трещины соответственно;

R_a, R_c — коэффициенты асимметрии цикла нагружения на k-м цикле нагружения в точках a и c трещины соответственно;

$\Delta K_{(th)}$ — пороговый размах КИН I-го рода;

$\omega^{\text{стар}}$ — коэффициент ускорения роста трещины вследствие температурного старения.

Расчет $\Delta K_{(a)}$, $\Delta K_{(c)}$, R_a, R_c выполняют согласно В.1 (приложение В).

Расчет C_f проводят для максимальной температуры k-го цикла нагружения и повреждающей дозы, соответствующей моменту времени на конец k-го цикла нагружения.

Значения ΔK_{th}, $\omega^{\text{стар}}$ и C_f рассчитывают по формулам приложения В, ГОСТ Р 59115.6 или принимают на основе данных, приведенных в обосновывающих отчетах по материалам, или по техническим решениям, согласованным с ГМО.

12.3.4 Текущие размеры трещины следует определять по формулам:

$$a_k = a_{k-1} + \Delta a_k; \quad (12.10)$$

$$c_k = c_{k-1} + \Delta c_k, \quad (12.11)$$

где a_k и c_k — размеры трещины на k-м цикле нагружения.

Примечание — Если невозможно выделить цикл нагружения (КИН в начале и конце цикла должен быть один и тот же), то в качестве характеристик цикла нагружения (ΔK, R) следует принимать характеристики полуцикла. При этом количество этих циклов следует принимать равным количеству таких полуциклов.

12.3.5 Конечные размеры $a_{\tau N}$ и $c_{\tau N}$ (при температуре T выше T_t), или a_N и c_N (при температуре T, не превышающей T_t) трещины при циклическом нагружении следует определять последовательным повторением расчета в соответствии с 12.3.2 и 12.3.4 до тех пор, пока не будут учтены все циклы нагружения.

12.4 Анализ условий прочности для материалов ферритного класса при температуре T, превышающей T_t, и для коррозионно-стойких материалов аустенитного класса

12.4.1 Анализ условий прочности для аустенитной антикоррозионной наплавки следует проводить по ГОСТ Р 59115.14.

12.4.2 Условия прочности компонента с трещиной согласно 5.3.1 считают выполненными, если для каждого рассматриваемого момента времени протекания расчетного режима выполнены условия:

$$n \cdot K_{(a)}(P_p, P_s) < K_{JC}; \quad (12.12)$$

$$n \cdot K_{(c)}(P_p, P_s) < K_{JC}, \quad (12.13)$$

где $K_{(a)}(P_p,P_s)$, $K_{(c)}(P_p,P_s)$ — значения КИН в точках a и c трещины соответственно, с учетом механической P_p и вторичной P_s нагрузок, МПа;

K_{JC} — трещиностойкость, определяемая по формуле

$$K_{JC} = \sqrt{\frac{10^{-3} \cdot E^T J_c}{1-\nu^2}}, \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}; \quad (12.14)$$

n — коэффициент запаса.

Примечания

1 Расчет КИН рекомендуется проводить методом МВФ с использованием распределения нормальных напряжений σ_n к плоскости трещины, рассчитанных при ее отсутствии. Определение σ_n следует проводить с помощью расчета в упруго-вязкопластической постановке (при $T > T_t$) или расчета в упругопластической постановке (при $T \le T_t$).

2 Если в компоненте рассматривается зона с остаточными сварочными напряжениями $\sigma_{осн}$, то для этой зоны при расчете КИН вместо σ_n используется величина $\sigma_n + \sigma_{осн}$, где $\sigma_{осн} = \left[(\sigma^0_{0,2})^{1-n_c} - E^T \cdot \frac{a_c}{(\sigma_0)^{n_c}} \cdot t_j \cdot (1-n_c)\right]^{\frac{1}{1-n_c}}$; $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала в исходном (необлученном) состоянии; E^T — модуль упругости; a_c, n_c, σ_0 — параметры уравнения установившейся ползучести, определяемые в соответствии с Е.6 (приложение Е). Для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 и 07Х12НМФБ значения a_c и n_c приведены в таблице Д.1 (приложение Д). Значения a_c и n_c для остальных материалов принимаются согласно ГОСТ Р 59115.4.

Значение коэффициента запаса n следует принимать равным 1,1.

Значения E^T и J_c для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 принимают согласно приложениям А и Б.

Значение K_{JC} для материалов ферритного класса принимают согласно ГОСТ Р 59115.6.

12.4.3 Дополнительно для каждого рассматриваемого момента времени τ протекания расчетного режима должны выполняться условия отсутствия потери несущей способности компонента с трещиной согласно 5.3.3:

$$\sigma_{ref}(a, c, P_p) \le R^T_{p0,2}; \quad (12.15)$$

$$a \le 0{,}5S_k. \quad (12.16)$$

Расчет σ_{ref} проводят в соответствии с приложением Л с учетом размеров (a и c) трещины и напряжений, вызванных механической нагрузкой P_p.

Значение $R^T_{p0,2}$ принимают согласно приложению А (для стали марки 07Х12НМФБ) и ГОСТ Р 59115.3.

12.4.4 В качестве размеров расчетного дефекта (a и c) следует принимать:

- для постулируемого по 6.4 дефекта — значения $a_{\tau N}$ и $c_{\tau N}$ (при температуре T выше T_t) или a_N и c_N (при температуре T, не превышающей T_t), определенные по 12.3;
- для постулируемого по 6.5 дефекта — значения a_0 и c_0, принятые по 7.2.

12.4.5 Если при анализе развития трещины значение a составило значение менее $0{,}5S_к$, то для обеспечения прочности компонента с трещиной дополнительно необходимо подтвердить выполнение условий (12.12), (12.13) и (12.15) при $a \le 0{,}5S_к$.

12.5 Анализ условий прочности для материалов ферритного класса при температуре T, не превышающей T_t

12.5.1 Условие прочности считают выполненным, если для каждого рассматриваемого момента времени τ протекания расчетного режима выполнено условие

$$\frac{1}{B_p}\int_0^{B_p} Z_c dL < 1, \tag{12.17}$$

где B_p — длина фронта трещины, рассчитываемая как длина дуги полуэллиптического или четвертьэллиптического дефекта;

L — криволинейная координата фронта трещины (см. рисунок 12.1);

Z_c — параметр, характеризующий состояние каждой точки фронта расчетной трещины в зависимости от максимальной величины параметра α за весь период нагружения от 0 до рассматриваемого момента времени τ.

12.5.2 Для режимов с изотермическими монотонными условиями нагружения для каждого значения L значение параметра Z_c в формуле (12.17) рассчитывают по формуле

$$Z_c = \left(\frac{n_j \cdot K_J(L) - K_{min}}{K_C - K_{min}}\right)^4, \tag{12.18}$$

где $K_J(L)$ — распределение K_J при расчетной температуре в зависимости от координаты L (см. рисунок 12.1).

Примечание — Под K_J понимается коэффициент интенсивности напряжений, определяемый методами как линейной, так и нелинейной механики разрушения с учетом зависимости свойств материала от температуры и с учетом остаточных напряжений. Условия использования линейной и нелинейной механики разрушения приведены в ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 12).

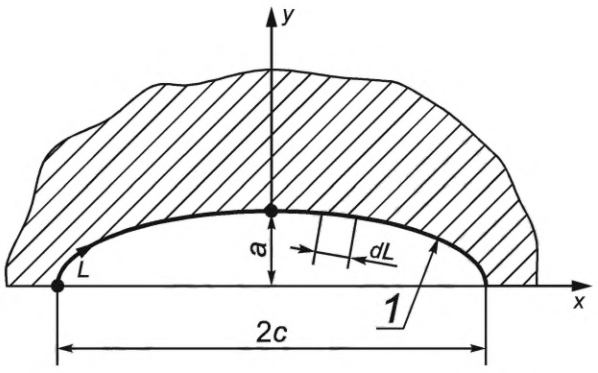


Рисунок 12.1 — Схематизация расчетной поверхностной полуэллиптической трещины

12.5.3 Для режимов с неизотермическими немонотонными условиями нагружения расчет проводят согласно 12.5.3.1 с использованием формулы (12.17) или согласно 12.5.3.2 для получения упрощенной консервативной оценки прочности.

12.5.3.1 Для каждого значения L значение параметра Z_c в формуле (12.17) рассчитывают по формуле

$$Z_c = \max_{(0,\tau)} (\alpha), \tag{12.19}$$

где α — параметр, который для каждого значения L рассчитывают по формуле

$$\alpha = \begin{cases} \left(\dfrac{n_i \cdot K_J(L,\tau) - K_{min}}{K_C(L,\tau) - K_{min}}\right)^4, \text{ если } K_J(L,\tau) \geq 0{,}9 \cdot K_{max}(L,\tau) \text{ и } \dot{K}_J(L,\tau) \geq 0 \\ 0, \text{ если } K_J(L,\tau) < 0{,}9 \cdot K_{max}(L,\tau) \text{ или } K_J(L,\tau) < 0 \end{cases}; \tag{12.20}$$

$K_{max}(L,\tau) = \max_{(0,\tau)} [K_J(L,\tau)]$ — распределение максимального значения K_J по фронту трещины (по координате L) за период нагружения от 0 до текущего момента времени τ;

$K_J(L,\tau)$ — распределение K_J по фронту трещины в момент времени τ;

$K_C(L,\tau)$ — распределение K_C по фронту трещины в момент времени τ вследствие неоднородного распределения температуры вдоль фронта трещины, изменяющегося от времени;

$$K_{min} = 20 \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}};$$

$\dot{K}_J(L,\tau)$ — распределение скорости изменения K_J по фронту трещины в момент времени τ;

n_i — коэффициент запаса.

Примечание — При расчетах по формулам (12.18) и (12.20) в случае, когда $n_i \cdot K_J < K_{min}$, принимают $n_i \cdot K_J = K_{min}$.

12.5.3.2 Для получения упрощенной консервативной оценки допускают проводить анализ прочности по следующей процедуре.

Условия прочности считают выполненными, если для каждого рассматриваемого момента времени τ протекания расчетного режима для каждой точки фронта расчетного дефекта выполнено условие

$$n_i \cdot K \leq K_C, \tag{12.21}$$

исключая те моменты времени, когда выполнено условие $\dot{K}_J < 0$ или $K_J < 0{,}9 \cdot K_{max}(L,\tau)$.

12.5.4 Значение коэффициента запаса n_i следует принимать равным:

- 2,0 при НУЭ;
- 1,5 при ННУЭ и гидравлических испытаниях;
- 1,0 при проектной аварии.

12.5.5 Значение K_C рассчитывают по формуле

$$K_C = \omega \cdot \omega_b \cdot K_{JC}(T), \tag{12.22}$$

где

$$K_{JC}(T) = \begin{cases} K_{JC}^{0,05}(T), \text{ при } K_{JC}^{0,05}(T) < K_{JC}^{вш}(T) \\ K_{JC}^{вш}(T), \text{ при } K_{JC}^{0,05}(T) \geq K_{JC}^{вш}(T) \end{cases}; \tag{12.23}$$

$$K_{JC}^{0,05}(T) = 0{,}52 \cdot \left(\frac{B_0}{B_p}\right)^{1/4} \cdot (K_{JC(med)}(T) - K_{min}) + K_{min}, \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}, \tag{12.24}$$

где ω, ω_b — коэффициенты, учитывающие влияние коротких трещин и двухосного нагружения на трещиностойкость соответственно;

$B_0 = 25$ мм;

где $K_{JC(med)}$ — медианное (соответствующее вероятности хрупкого разрушения 0,5) значение статической трещиностойкости K_{JC} для длины фронта трещины, равной 25 мм, МПа·$\sqrt{\text{м}}$;

$K_{\min}$ — минимально возможная статическая трещиностойкость, равная 20 МПа·$\sqrt{\text{м}}$;

$K_{JC}^{0,05}$ — трещиностойкость при длине фронта трещины B_p и вероятности хрупкого разрушения 0,05.

При расчете по формуле (12.24), если B_p > 200 мм, принимают B_p = 200 мм.

Значение $K_{JC(med)}$ принимают согласно ГОСТ Р 59115.6.

Значения ω и ω_b определяют по приложению М.

12.5.6 Дополнительно должны выполняться условия отсутствия потери несущей способности компонента с трещиной согласно 5.3.3:

$$\sigma_{ref}(a,c,P_p) \le R_{p0,2}^T; \tag{12.25}$$

$$a \le 0,5S_к. \tag{12.26}$$

Расчет σ_{ref} проводят в соответствии с приложением Л с учетом размеров a и c дефекта и напряжений, вызванных механической нагрузкой P_p.

Значение $R_{p0,2}^T$ принимают согласно ГОСТ Р 59115.3.

12.5.7 В качестве размеров расчетного дефекта a и c следует принимать:

- для постулируемого по 6.4 дефекта — значения a_N и c_N, определенные по 12.3;
- для постулируемого по 6.5 дефекта — значения a_0 и c_0, принятые по 7.2.

12.5.8 Если при анализе развития трещины значение a составило меньше $0,5S_к$, то для обеспечения прочности компонента с трещиной дополнительно необходимо подтвердить выполнение условий (12.17), (12.21) и (12.25) при $a = 0,5S_к$.

Приложение А
(рекомендуемое)

Физико-механические свойства и диаграмма деформирования

А.1 Механические свойства и диаграмма деформирования основного металла и металла сварного шва сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3

А.1.1 Зависимость предела текучести от температуры

Зависимость средних значений предела текучести от температуры для исходного (необлученного) состояния основного металла и сварного шва в области температур эксплуатации описывают формулой

$$\bar{R}_{p0,2}(T) = \sigma_{YG} + \sigma_{YS}, \text{ МПа, при } 20\ ^\circ\text{C} \le T \le 650\ ^\circ\text{C}, \quad (A.1)$$

где $\sigma_{YS} = \beta \cdot \exp(-h[T + 273])$, МПа;

σ_{YG}, σ_{YS} — температурно-независимая и температурно-зависимая компоненты предела текучести соответственно, МПа;

β, h — константы материала, независящие от температуры.

Значения констант σ_{YG}, β и h приведены в таблице А.1.

Таблица А.1 — Значения констант σ_{YG}, β и h для основного металла и металла шва сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3

Материал	σ_{YG}, МПа	β, МПа	h, K^{-1}
Основной металл сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9	115	239	$2{,}2 \cdot 10^{-3}$
Металл сварного шва сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3	202	239	$2{,}2 \cdot 10^{-3}$
Основной металл стали марки 08Х16Н11М3	125	239	$2{,}2 \cdot 10^{-3}$

А.1.2 Зависимость предела прочности от температуры

Зависимость средних значений предела прочности от температуры для материала в исходном состоянии описывают формулой:

- для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9

$$\bar{R}_m(T) = \begin{cases} 391 + 240 \cdot \exp\left(-6{,}95 \cdot 10^{-3} \cdot T\right), \text{ МПа, при } 20\ ^\circ\text{C} \le T < 450\ ^\circ\text{C} \\ 617 - 0{,}49 \cdot T, \text{ МПа, при } 450\ ^\circ\text{C} \le T \le 650\ ^\circ\text{C} \end{cases}; \quad (A.2)$$

- для стали марки 08Х16Н11М3

$$\bar{R}_m(T) = \begin{cases} 463 + 153 \cdot \exp\left(-9{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot T\right), \text{ МПа, при } 20\ ^\circ\text{C} \le T < 550\ ^\circ\text{C} \\ 1081 - 1{,}122 \cdot T, \text{ МПа, при } 550\ ^\circ\text{C} \le T \le 650\ ^\circ\text{C} \end{cases}. \quad (A.3)$$

А.1.3 Зависимость модуля упругости от температуры

Зависимость модуля упругости от температуры для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 описывают формулой

$$E^T = 206000 - 83 \cdot T, \text{ МПа}. \quad (A.4)$$

А.1.4 Зависимость критической деформации разрушения от температуры

А.1.4.1 Расчет критической деформации разрушения при кратковременных испытаниях на растяжение проводят по следующей формуле

$$\varepsilon_f = \varepsilon_f^0 \cdot \Psi(P_{Holl}), \quad (A.5)$$

где

$$\psi(P_{Holl}) = \begin{cases} -A_{aging} \cdot P_{Holl} + B_{aging}, \text{ при } P_{Holl} \geq P_{th} \\ 1, \text{ при } P_{Holl} < P_{th} \end{cases}; \quad (A.6)$$

P_{th} = 6415;

- для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9: A_{aging} = 1,490 · 10^{-4}; B_{aging} = 1,956;
- для стали марки 08Х16Н11М3: A_{aging} = 1,97 · 10^{-4}; B_{aging} = 2,26;

ε_f^0 — критическая деформация разрушения при одноосном растяжении для исходного состояния материала, ε_f^0 = 0,69.

Параметр P_{Holl} вычисляют по формуле

$$P_{Holl} = (T + 273) \cdot (c + \lg(t)), \quad (A.7)$$

где T — температура в °С;

c = 5,15.

А.1.4.2 Относительное сужение поперечного сечения рассчитывают по формуле

$$Z^T = 100 \cdot (1 - e^{-\varepsilon_f}), \%. \quad (A.8)$$

А.1.5 Диаграмма деформирования

Расчет диаграммы деформирования проводят по формуле

$$\sigma_{eq}(T) = \bar{R}_{p0,2}(T) + A(T) \cdot æ_p^{n_p(T)} \text{ при } \sigma_{eq} \geq \bar{R}_{p0,2}, \quad (A.9)$$

где $æ_p = \int d\varepsilon_{eq}^p$;

$$A(T) = b_1 - b_2 \cdot \text{ при } T \geq 200 \text{ °C}; \quad (A.10)$$

$$n_p(T) = 0,5 \cdot \left(\frac{A}{A_0}\right)^{0,5}; \quad (A.11)$$

A_0 = 1000 МПа;

- для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9: b_1 = 1408 МПа; b_2 = 1,4 Мпа · °C^{-1}; b_3 = 1,6;
- для стали марки 08Х16Н11М3: b_1 = 1482 МПа; b_2 = 1,4 МПа · °C^{-1}; b_3 = 1,6.

Если расчет по формуле (А.9) приводит к A < 0, то принимают A = 0.

А.2 Механические свойства и диаграмма деформирования стали марки 07Х12НМФБ

А.2.1 Зависимость предела текучести от температуры

А.2.1.1 Зависимость средних значений предела текучести для основного металла и металла шва от температуры в области температур эксплуатации описывают формулой

$$\bar{R}_{p0,2} = 611 - 0,857 \cdot T + 2,51 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 2,97 \cdot 10^{-6} \cdot T^3, \text{ МПа}. \quad (A.12)$$

А.2.1.2 Зависимость минимальных значений предела текучести для основного металла и металла шва от температуры описывают формулой

$$R_{p0,2}^T = 536 - 0,857 \cdot T + 2,51 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 2,97 \cdot 10^{-6} \cdot T^3, \text{ МПа}. \quad (A.13)$$

А.2.2 Зависимость предела прочности от температуры

А.2.2.1 Зависимость средних значений предела прочности от температуры описывают формулой

$$\bar{R}_m(T) = 752 - 1,19 \cdot T + 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 4,83 \cdot 10^{-6} \cdot T^3, \text{ МПа}. \quad (A.14)$$

А.2.2.2 Зависимость минимальных значений предела прочности от температуры описывают формулой

$$R_m^T(T) = 677 - 1,19 \cdot T + 3,87 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 4,83 \cdot 10^{-6} \cdot T, \text{ МПа}. \quad (A.15)$$

А.2.3 Зависимость модуля Юнга от температуры

Зависимость модуля Юнга от температуры описывают формулой

$$E^T = 205000 - 24{,}2 \cdot T - 1{,}15 \cdot 10^{-1} T^2, \text{ МПа}. \quad (A.16)$$

А.2.4 Зависимость критической деформации разрушения от температуры

Зависимость деформации разрушения при кратковременных испытаниях на растяжение от температуры описывают формулой

$$\varepsilon_f = -\ln\left(1 - \frac{Z^T}{100}\right), \quad (A.17)$$

где

$$Z^T = 65{,}5 - 5{,}43 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1{,}10 \cdot 10^{-4} T^2, \ \%. \quad (A.18)$$

А.2.5 Диаграмма деформирования

А.2.5.1 Расчет диаграммы деформирования материала (для основного металла и металла сварного шва) проводят по формуле

$$\sigma_{eq} = \bar{R}_{p0,2} + A \cdot æ_p^n \text{ при } \sigma_{eq} \geq \bar{R}_{p0,2}, \quad (A.19)$$

где $æ_p = \int d\varepsilon_{eq}^p$;

A и n — параметры материала, зависящие от температуры.

Формула (А.19) справедлива при пластическом деформировании материала.

А.2.5.2 Параметры диаграммы деформирования A и n рассчитывают по формулам:

$$A = 782{,}4 - 1{,}98 \cdot T + 7{,}01 \cdot 10^{-3} T^2 - 8{,}68 \cdot 10^{-6} T^3; \quad (A.20)$$

$$n = 0{,}49 + 9{,}13 \cdot 10^{-4} T - 1{,}47 \cdot 10^{-6} T^2. \quad (A.21)$$

Формулы (А.12)—(А.21) справедливы для диапазона температур от 20 °С до 600 °С.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Статическая трещиностойкость

Статическая трещиностойкость в терминах критического значения *J*-интеграла основного металла и металла сварного шва сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 следует определять по формуле

$$J_C = C_J \cdot \sigma_{flow} \cdot \Psi(P_{HolI}), \text{ Н/мм}, \quad (Б.1)$$

где

$$\sigma_{flow} = \frac{\bar{R}_{p0,2} + \bar{R}_m}{2}. \quad (Б.2)$$

Значение параметра C_J принимают равным 0,27 для основного металла и 0,19 для металла сварных швов.

Расчет $\bar{R}_{p0,2}$ и $\bar{R}_m$ следует выполнять согласно А.1 приложения А.

Расчет $\psi(P_{HolI})$ для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9 и 08Х16Н11М3 выполняют по формуле (А.6) приложения А.

Расчет $\psi(P_{HolI})$ для сварных швов сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 выполняют по следующим формулам:

- для аустенизированного сварного шва, выполненного с использованием сварочной проволоки марки Св-02Х17Н10М2-ВИ или электрода марки А-2 (А-2Т):

$$\psi\left(P_{HolI}\right) = \begin{cases} -A_{aging} \cdot P_{HolI} + B_{aging}, \text{ при } P_{th} < P_{HolI} \le 8350 \\ a_1 \cdot \exp\left(\dfrac{a_2}{P_{HolI} - a_3}\right) + a_4, \text{ при } P_{HolI} > 8350 \\ 1, \text{ при } P_{HolI} \le P_{th} \end{cases}, \quad (Б.3)$$

где $A_{aging} = 8{,}75 \cdot 10^{-5}$; $B_{aging} = 1{,}56$; $a_1 = 1{,}82$; $a_2 = 1076$; $a_3 = 9502$; $a_4 = 0{,}12$;

- для неаустенизированного сварного шва, выполненного с использованием сварочной проволоки марок Св-02Х17Н10М2-ВИ, Св-04Х17Н10М2 или электродов марок А-1 (А-1Т), А-2 (А-2Т), а также для аустенизированного сварного шва, выполненного с использованием сварочной проволоки марки Св-04Х17Н10М2 или электрода марки А-1 (А-1Т):

$$\psi_{w2}\left(P_{HolI}\right) = \begin{cases} -A_{aging} \cdot P_{HolI} + B_{aging}, \text{ при } P_{th} < P_{HolI} \le 8200 \\ a_1 \cdot \exp\left(\dfrac{a_2}{P_{HolI} - a_3}\right) + a_4, \text{ при } P_{HolI} > 8200 \\ 1, \text{ при } P_{HolI} \le P_{th} \end{cases}, \quad (Б.4)$$

где $A_{aging} = 2{,}44 \cdot 10^{-4}$; $B_{aging} = 2{,}56$; $a_1 = 0{,}81$; $a_2 = 725$; $a_3 = 9498$; $a_4 = 0{,}1$.

Приложение В
(рекомендуемое)

Скорость роста трещины при циклическом нагружении

В.1 Скорость роста трещины при циклическом нагружении для основного металла и металла сварного шва сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3

В.1.1 Скорость роста трещины при циклическом нагружении (циклическая трещиностойкость) при температурах от 20 °С до 650 °С рассчитывают по формуле

$$\left(\frac{dl}{dN}\right)_{исх} = \begin{cases} C_f \cdot \left[\dfrac{\Delta K}{(1-R)^{0,25}}\right]^{n_f}, & \text{при } \Delta K > \Delta K_{th} \\ 0, & \text{при } \Delta K \le \Delta K_{th} \end{cases}, \text{ мм/цикл,} \quad (В.1)$$

где R — коэффициент асимметрии цикла нагружения, $R = \dfrac{K_{min}}{K_{max}}$:

- если $R < 0$, то принимают $R = 0$;
- если $R > 0,95$, то принимают $R = 0,95$;

$n_f = 3,3$;

$$\Delta K = \begin{cases} K_{max} - K_{min}, & \text{при } K_{min} > 0 \\ K_{max}, & \text{при } K_{min} \le 0 \end{cases}. \quad (В.2)$$

Значение C_f для основного металла и металла сварных швов рассчитывают по формуле

$$C_f = \begin{cases} 5,20 \cdot 10^{-9}, & \text{при } T \le 350\ °C \\ 5,20 \cdot 10^{-9} \cdot \exp(0,342 \cdot (T - 350)^{0,356}), & \text{при } T > 350\ °C \end{cases}. \quad (В.3)$$

В.1.2 Скорость роста трещины при циклическом нагружении с учетом термического старения рассчитывают по формуле

$$\left(\frac{dl}{dN}\right) = \omega^{стар}(P_{Holl}) \cdot \left(\frac{dl}{dN}\right)_{исх}, \quad (В.4)$$

где

$$\omega^{стар}(P_{Holl}) = [\Psi(P_{Holl})]^{-1,65}. \quad (В.5)$$

Значение $\psi(P_{Holl})$ рассчитывают по формуле (А.6) (приложение А).

В.1.3 Значение ΔK_{th} рассчитывают по формуле

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th}^0 \cdot (1 - 0,65 \cdot R), \quad (В.6)$$

где:

- для основного металла

$$\Delta K_{th}^0 = \begin{cases} 6,14 \cdot \left(1 - \left(\dfrac{G_z}{10,8}\right)^{3,9}\right), & \text{при } 20\ °C \le T < 550\ °C \\ 2,50, & \text{при } 550\ °C \le T \le 600\ °C \end{cases}, \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}; \quad (В.7)$$

- для металла сварных швов

$$\Delta K_{th}^0 = \begin{cases} 3,85, & \text{при } 20\ °C \le T < 550\ °C \\ 2,50, & \text{при } 550\ °C \le T \le 600\ °C \end{cases}, \text{ МПа}\cdot\sqrt{\text{м}}; \quad (В.8)$$

G_z — номер (балл) зерна, определяемый на основе технических условий, указанных в конструкторской документации.

Формула (В.7) применима для значений G_z в диапазоне от 4 до 8; если $G_z < 4$, расчет по формуле (В.7) проводится при $G_z = 4$. Если балл зерна в конструкторской документации не указан, то следует принимать G_z равным 8.

В.2 Скорость роста трещины при циклическом нагружении для стали марки 07Х12НМФБ

В.2.1 Скорость роста усталостной трещины для стали марки 07Х12НМФБ при температурах эксплуатации от 20 °С до 550 °С рассчитывают по формуле

$$\frac{dl}{dN} = \begin{cases} C_f \cdot \left[\frac{\Delta K}{(1-R)^{0,25}}\right]^{n_f}, & \text{при } \Delta K > \Delta K_{th} \\ 0, & \text{при } \Delta K \le \Delta K_{th} \end{cases}, \text{ мм/цикл,} \quad (В.9)$$

где

- если $R < 0$, то принимают $R = 0$;
- если $R > 0,95$, то принимают $R = 0,95$;

$C_f = 1,09 \cdot 10^{-7}$; $n_f = 2,9$;

$$\Delta K = \begin{cases} K_{max} - K_{min}, & \text{при } K_{min} > 0 \\ K_{max}, & \text{при } K_{min} \le 0 \end{cases}. \quad (В.10)$$

В.2.2 Значение ΔK_{th} рассчитывают по формуле

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{th}^{0} \cdot (1 - 0,65 \cdot R), \quad (В.11)$$

где ΔK_{th}^{0} = 3,35 МПа$\sqrt{м}$ при 20 °С ≤ T ≤ 550 °С.

В.2.3 В формулах (В.8) и (В.9):

- $R = 0,95$, если $R > 0,95$;
- $R = 0$, если $R < 0$.

Приложение Г
(рекомендуемое)

Скорость роста трещины при ползучести

Скорость роста трещины рассчитывают по формуле

$$\left(\frac{dl}{dt}\right)_{\text{исх}} = A_r\left(C^*\right)^{n_r}, \ \frac{\text{мм}}{\text{ч}}, \tag{Г.1}$$

где A_r, n_r — константы материала (значения констант для основного металла и металла сварного шва сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 и стали марки 07Х12НМФБ приведены в таблице Г.1);

l — длина трещины, мм;

t — время, ч;

C^* — контурный интеграл, определяемый по формуле

$$C^* = \int_{\Gamma}\left(W^* n_1 - \sigma_{ij} n_j \frac{d\dot{u}_i}{dx_1}\right)ds, \tag{Г.2}$$

где Γ — криволинейный контур, начинающийся на одном берегу трещины и заканчивающийся на другом берегу трещины, по которому проводят интегрирование;

$$W^* = \int_0^{\xi_{ij}} \sigma_{mn}\, d\xi^c_{mn};$$

$\dot{u}_i = \frac{du_i}{dt}$ — скорость перемещения в направлении x_i;

x_1, x_2 — декартовые координаты;

n_j — компонента единичного вектора, перпендикулярного к элементу ds;

ds — элемент контура Γ;

σ_{mn} — компоненты тензора напряжений;

ξ^c_{mn}, ξ^c_{ij} — компоненты тензора скоростей деформаций ползучести.

Таблица Г.1 — Значения коэффициентов A_r и n_r для основного металла и металла сварного шва сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3, 07Х12НМФБ

Температура, °С	$A_r, \left(\frac{\text{ч}}{\text{мм}}\right)^{n_r-1} \cdot \text{МПа}^{-n_r}$	n_r
Стали марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3		
$450 \le T \le 600$	$5{,}8 \cdot 10^{-2}$	0,81
Сталь марки 07Х12НМФБ		
$450 \le T \le 600$	$2{,}0 \cdot 10^{-1}$	0,9

Допускают рассчитывать C^*-интеграл по упрощенной формуле

$$C^* = 10^{-3} \cdot K^2 \cdot \frac{\xi_{ref}}{\sigma_{ref}}, \ \frac{\text{МПа} \cdot \text{мм}}{\text{ч}}, \tag{Г.3}$$

где K — КИН I-го рода, МПа·$\sqrt{\text{м}}$;

σ_{ref} — референсное напряжение, определяемое в соответствии с приложением К, МПа;

ξ_{ref} — скорость ползучести необлученного материала, рассчитываемая по формуле (Д.13) (приложение Д) при $\xi^c_{eq} = \xi_{ref}$ и $\sigma_{eq} = \sigma_{ref}$, ч^{-1}.

Расчет ξ_{ref} при температурах, не указанных в таблице Д.1 (приложение Д), проводят по формуле (Д.12) (приложение Д), где вместо ξ_{eq} подставляют ξ_{ref}.

Формулы (Г.1) и (Г.3) справедливы для диапазона температур от 450 °С до 600 °С.

Если 450 °С < T < 500 °С, то расчет проводят при T = 500 °С.

Приложение Д
(рекомендуемое)

Скорость ползучести

Д.1 В настоящем приложении применены следующие дополнительные обозначения:

ε^c_{ij} — компоненты тензора деформаций ползучести;

$d\varepsilon^c_{ij}$ — приращения компонент тензора деформаций ползучести;

ξ^c_{ij} — компоненты тензора скоростей деформаций ползучести, $ч^{-1}$;

ξ^c_{eq} — интенсивность деформации ползучести материала в исходном состоянии, $ч^{-1}$;

dt — приращение времени, ч;

σ_{ij} — компоненты тензора напряжений, МПа;

β_{ij} — компоненты девиатора активных напряжений, МПа;

β_{eq} — интенсивность активных напряжений, МПа;

s_{ij} — компоненты девиатора действительного напряжения, МПа;

ρ_{ij} — компоненты микронапряжения, МПа;

δ_{ij} — символ Кронекера;

σ_m — гидростатическая компонента тензора напряжений, МПа;

σ_{eq} — интенсивность действительных напряжений, МПа;

T_a — абсолютная температура, К;

T — температура, °С.

Д.2 Для описания термоактивированной ползучести ($T \geq T_t$) используют следующее уравнение теории ползучести с анизотропным упрочнением:

$$d\varepsilon^c_{ij} = \frac{3}{2}\xi^c_{eq}\frac{\beta_{ij}}{\beta_{eq}}dt, \quad (Д.1)$$

где

$$\xi^c_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}\xi^c_{ij}\xi^c_{ij}}; \quad (Д.2)$$

$$\xi^c_{ij} = \frac{d\varepsilon^c_{ij}}{dt}; \quad (Д.3)$$

$$\beta_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}\beta_{ij}\beta_{ij}}; \quad (Д.4)$$

$$\beta_{ij} = s_{ij} - \rho_{ij}; \quad (Д.5)$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_m; \quad (Д.6)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ii}}{3}; \quad (Д.7)$$

$$d\rho_{ij} = \frac{3}{2}A_1 \cdot d\varepsilon^c_{ij} - C(\sigma_{eq}) \cdot \frac{\beta_{ij}}{\beta_{eq}}dt; \quad (Д.8)$$

$$C(\sigma_{eq}) = C_1 \cdot \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right)^{n_c}; \quad (Д.9)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}}; \quad (Д.10)$$

σ_0 = 100 МПа.

Интенсивность скорости деформации ползучести связана с интенсивностью активного напряжения формулой

$$\xi^c_{eq} = \Omega \cdot \left(\frac{\beta_{eq}}{\sigma_0}\right)^{n_c}, ч^{-1}. \quad (Д.11)$$

Значения констант A_1, C_1, Ω, n_c определяют из кривых ползучести в соответствии с Е.6 (приложение Е).

Константы A_1, C_1, Ω, n_c для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 и 07Х12НМФБ при различных температурах приведены в таблице Д.1.

Скорость ползучести при температуре, отличной от указанной в таблице Д.1, в интервале температур от 773 К (500 °С) до 873 К (600 °С), определяют по формуле

$$\xi^c_{\theta qx} = \xi^c_{\theta q1}\left(\frac{\xi^c_{\theta q2}}{\xi^c_{\theta q1}}\right)^{\frac{(T_{ax}-T_{a1})\cdot T_{a2}}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot T_{ax}}}, \qquad (Д.12)$$

где $\xi^c_{\theta qx}$ — скорость ползучести при температуре T_{ax} ($T_{a2} > T_{ax} > T_{a1}$);

T_{ax}, T_{a1}, T_{a2} — абсолютные температуры в градусах К;

$\xi^c_{\theta q1}$, $\xi^c_{\theta q2}$ — скорости ползучести, рассчитанные по формуле (Д.11) в соответствии с параметрами, указанными в таблице Д.1, при температурах T_{a1} и T_{a2} соответственно.

Таблица Д.1 — Значения константы в уравнениях скорости ползучести для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3, 07Х12НМФБ

Температура, К (°С)	A_1, $ч^{-1}$	Ω, $ч^{-1}$	n_c	C_1, $ч^{-1}$	a_c
стали марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9					
773 (500)	$4{,}03 \cdot 10^3$	$2{,}03 \cdot 10^{-8}$	13,5	$2{,}52 \cdot 10^{-7}$	$6{,}26 \cdot 10^{-11}$
823 (550)	852,0	$4{,}35 \cdot 10^{-27}$	10,2	$1{,}5 \cdot 10^{-25}$	$4{,}4 \cdot 10^{-8}$
873 (600)	710,0	$6{,}23 \cdot 10^{-22}$	8,2	$7{,}62 \cdot 10^{-20}$	$2{,}70 \cdot 10^{-6}$
сталь марки 08Х16Н11М3					
773 (500)	$3{,}45 \cdot 10^3$	$2{,}48 \cdot 10^{-9}$	13,8	$6{,}41 \cdot 10^{-8}$	$1{,}86 \cdot 10^{-11}$
823 (550)	$1{,}35 \cdot 10^3$	$1{,}14 \cdot 10^{-8}$	12,5	$8{,}30 \cdot 10^{-7}$	$6{,}17 \cdot 10^{-10}$
873 (600)	820,0	$5{,}54 \cdot 10^{-7}$	11,2	$7{,}13 \cdot 10^{-5}$	$8{,}70 \cdot 10^{-8}$
стали марки 07Х12НМФБ					
723 (450)	$7{,}61 \cdot 10^3$	$3{,}67 \cdot 10^{-15}$	15,2	$1{,}75 \cdot 10^{-13}$	$2{,}30 \cdot 10^{-17}$
773 (500)	$5{,}46 \cdot 10^3$	$9{,}56 \cdot 10^{-11}$	12,4	$5{,}40 \cdot 10^{-9}$	$9{,}90 \cdot 10^{-13}$
823 (550)	$3{,}79 \cdot 10^3$	$3{,}61 \cdot 10^{-7}$	9,95	$1{,}99 \cdot 10^{-5}$	$5{,}26 \cdot 10^{-9}$
873 (600)	$2{,}99 \cdot 10^3$	$4{,}91 \cdot 10^{-5}$	7,68	$3{,}10 \cdot 10^{-3}$	$1{,}04 \cdot 10^{-6}$

Д.3 Скорость ползучести, используемая при расчете релаксации напряжений и скорости роста трещины, принимают в виде

$$\xi^c_{\theta q} = a_c \cdot \left(\frac{\sigma_{\theta q}}{\sigma_0}\right)^{n_c}, \qquad (Д.13)$$

где σ_0 = 100 МПа.

Значения a_c и n_c для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 и 07Х12НМФБ при различных температурах приведены в таблице Д.1.

Приложение Е
(рекомендуемое)

Уравнения для определения напряженно-деформированного состояния компонента

Е.1 Основные уравнения

Для расчета НДС используют следующие уравнения:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \delta_{ij} \cdot \sigma_m; \tag{Е.1}$$

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^{e} + d\varepsilon_{ij}^{p} + d\varepsilon_{ij}^{c} + \delta_{ij} d\varepsilon^{T}; \tag{Е.2}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ii}}{3}; \tag{Е.3}$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } i = j \\ 0, & \text{при } i \neq j \end{cases}, \tag{Е.4}$$

где σ_{ij}, s_{ij} — компоненты тензора и девиатора действительных напряжений соответственно;

σ_m — гидростатическое напряжение;

$d\varepsilon_{ij}$, $d\varepsilon_{ij}^{e}$, $d\varepsilon_{ij}^{p}$, $d\varepsilon_{ij}^{c}$ — приращения компонент тензоров полных деформаций ε_{ij}, упругих деформаций ε_{ij}^{e}, пластических деформаций ε_{ij}^{p} и деформаций ползучести ε_{ij}^{c} соответственно;

$d\varepsilon^{T}$ — приращение деформации, обусловленной температурой.

Уравнения (Е.1)—(Е.4) позволяют описывать кинетику НДС компонента с учетом упруго-вязкопластического деформирования материала при известных его свойствах и заданных краевых условиях.

Для описания поведения материала в области упругого, пластического и вязкого деформирования используют уравнения, приведенные в Е.2—Е.4.

Е.2 Уравнения теории упругости

Уравнение, описывающее связь между напряжениями и деформациями в пределах упругости, записывают в виде

$$\varepsilon_{ij}^{e} = \frac{s_{ij}}{2G} + \delta_{ij} K \sigma_m, \tag{Е.5}$$

где

$$G = \frac{E^T}{2(1+\nu)}; \tag{Е.6}$$

$$K = \frac{1-2\nu}{E^T}; \tag{Е.7}$$

$E^T = E^T(T)$ — модуль упругости;

$G = G(T)$ — модуль сдвига;

$K = K(T)$ — коэффициент объемного сжатия;

ν — коэффициент Пуассона, $\nu = 0{,}3$.

Е.3 Уравнения теории пластичности

Е.3.1 Для описания пластического деформирования на основе теории течения с нелинейным кинематическим упрочнением используют уравнения, приведенные ниже. Расчет эквивалентных напряжений проводят с использованием энергетической теории Мизеса.

Компоненты тензора приращений пластических деформаций при активном нагружении определяют на основе ассоциированного (с условием пластичности) закона течения в соответствии с уравнениями

$$d\varepsilon_{ij}^{p} = \frac{3}{2} \frac{d\varepsilon_{eq}^{p}}{\beta_{eq}} \beta_{ij}, \tag{Е.8}$$

где

$$d\varepsilon_{eq}^{p} = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon_{ij}^{p} d\varepsilon_{ij}^{p}}; \tag{Е.9}$$

$$\beta_{ij} = s_{ij} - \rho_{ij}; \tag{Е.10}$$

$$\beta_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2}\beta_{ij}\beta_{ij}}; \quad (E.11)$$

β_{ij} — компоненты девиатора активных напряжений;
β_{eq} — интенсивность активных напряжений;
s_{ij} — компоненты девиатора действительных напряжений;
ρ_{ij} — компоненты микронапряжения, $\rho_{ij} = 0$.

Уравнение поверхности текучести принимают в виде

$$\left[\frac{3}{2}(s_{ij} - \rho_{ij})(s_{ij} - \rho_{ij})\right]^{1/2} - C_{p0} = 0, \quad (E.12)$$

где

C_{p0} — радиус поверхности текучести, $C_{p0} = \bar{R}_{p0,2}(T)$;

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_m; \quad (E.13)$$

σ_{ij} — компоненты тензора действительных напряжений;
δ_{ij} — символ Кронекера.

Уравнение для приращения микронапряжений $d\rho_{ij}$ принимают в виде

$$d\rho_{ij} = g_1 d\varepsilon^p_{ij} \varepsilon^p_{ij} - g_2 \rho_{ij} d\varepsilon^p_{eq}, \quad (E.14)$$

где g_1, g_2 — параметры, зависящие от температуры и повреждающей дозы.

Е.3.2 Для описания пластического деформирования идеального упругопластического тела используют следующие уравнения

$$d\varepsilon^p_{ij} = \frac{3}{2}\frac{d\varepsilon^p_{eq}}{\sigma_{eq}} s_{ij}, \quad (E.15)$$

где

$$d\varepsilon^p_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3} d\varepsilon^p_{ij} d\varepsilon^p_{ij}}; \quad (E.16)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}; \quad (E.17)$$

$$\sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}} = \bar{R}_{p0,2}(T). \quad (E.18)$$

Е.4 Уравнения теории ползучести

Для описания ползучести следует использовать формулы приложения Д.

Е.5 Определение параметров g_1 и g_2 в уравнении пластичности с нелинейным кинематическим упрочнением

Параметры g_1 и g_2 следует определять из диаграммы пластического деформирования с использованием формул (Е.12)—(Е.14).

В соответствии с формулой (А.18) (приложение А) для описания диаграмм пластического деформирования используют зависимость, которая для одноосного растяжения может быть представлена формулой

$$\sigma_{11} - \sigma_{0,2} = A \cdot (\varepsilon^p_{11})^n, \quad (E.19)$$

где для одноосного случая $\varepsilon^p_{11} = æ_p$; $\sigma_{11} = \sigma_{eq}$;

A, n — параметры материала, зависящие от температуры T расчетного режима.

Для одноосного растяжения и кинематического упрочнения уравнение (Е.12) принимают в виде

$$\rho_{11} = \frac{2}{3}(\sigma_{11} - C_{p0}). \quad (E.20)$$

Уравнение (Е.20) с учетом (Е.19) имеет вид

$$\rho_{11} = \frac{2}{3} A \cdot \left(\varepsilon_{11}^{p}\right)^{n}. \tag{Е.21}$$

В результате интегрирования уравнения (Е.14) с учетом растяжения ($\varepsilon_{11}^{p} > 0$) получают уравнение

$$\rho_{11} = \frac{g_1}{g_2}\left[1 - \exp\left(-g_2 \varepsilon_{11}^{p}\right)\right]. \tag{Е.22}$$

Параметры g_1 и g_2 определяют методом наименьших квадратов на основе уравнений (Е.22) и (Е.20) путем минимизации среднеквадратичной ошибки, заданной уравнением

$$\min \sum_{k=1}^{N} \left(\frac{g_1}{g_2}\left[1 - \exp\left(-g_2 \left(\varepsilon_{11}^{p}\right)_k\right)\right] - \frac{2}{3} A \cdot \left(\left(\varepsilon_{11}^{p}\right)_k\right)^{n} \right)^2, \tag{Е.23}$$

где в качестве входной информации используют численные значения ε_{11}^{p};

N — количество значений деформации ε_{11}^{p}.

Е.6 Определение параметров в уравнениях ползучести с анизотропным упрочнением

Расчетные параметры уравнений определяют по результатам изотермического одноосного нагружения цилиндрических образцов при испытании цилиндрических образцов на ползучесть.

При постоянном растягивающем напряжении $\sigma_{11} = \sigma_{eq} = \sigma$. Тогда из уравнений (Д.5), (Д.6) и (Д.7) (приложение Д) получают

$$\beta_{11} = \frac{2}{3}\sigma_{11} - \rho_{11}. \tag{Е.24}$$

Интенсивность активных напряжений в соответствии с уравнением (Д.4) (приложение Д) определяют по формуле

$$\beta_{eq} = \sigma_{11} - \frac{2}{3}\rho_{11}. \tag{Е.25}$$

В результате уравнение для деформации ползучести (Д.1) (приложение Д) в случае одноосного нагружения с учетом уравнения (Е.25) представляют в виде

$$d\varepsilon_{c11} = \xi^{c} dt, \tag{Е.26}$$

где $\xi^{c} = \xi_{11}^{c} = \xi_{eq}^{c}$.

Уравнение (Д.8) (приложение Д) для микронапряжений с учетом одноосного нагружения представляют в виде

$$d\rho_{11} = \frac{2}{3} A_1 \cdot d\varepsilon_{11}^{c} - C_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{n_c} \cdot \frac{\frac{2}{3}\sigma_{11} - \rho_{11}}{\sigma_{11} - \frac{2}{3}\rho_{11}} dt, \tag{Е.27}$$

где $\sigma = \sigma_{11} = \sigma_{eq}$.

При обозначении $\rho_{11} = \frac{2}{3}\rho$, уравнение (Е.27) с учетом уравнения (Е.26) представляют в виде

$$d\rho = A_1 \cdot \xi^{c} \cdot dt - C_1 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{n_c} dt. \tag{Е.28}$$

Минимальную скорость ползучести $\xi_{\min}^{c}$ определяют из уравнения (Е.28) при условии $\rho = const$ и $\frac{d\rho}{dt} = 0$

$$\xi_{\min}^{c} = \frac{C_1}{A_1} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^{n_c}. \tag{Е.29}$$

Уравнение для интенсивности скорости деформации ползучести (Д.11) (приложение Д) с учетом уравнения (Е.25) имеет вид

$$\xi^{c} = \Omega \cdot \left(\frac{\sigma_{11} - \frac{3}{2}\rho_{11}}{\sigma_0}\right)^{n_c} = \Omega \cdot \left(\frac{\sigma - \rho}{\sigma_0}\right)^{n_c}. \tag{Е.30}$$

При подстановке уравнения (Е.30) в уравнение (Е.28) и учитывая уравнение (Е.29) получают уравнение

$$\frac{d\rho}{dt} = A_1 \cdot \left(\Omega \cdot \left(\frac{\sigma - \rho}{\sigma_0}\right)^{n_c} - \xi_{\min}^{c}\right). \tag{Е.31}$$

В уравнении (Е.31) степень n_c определяют из установившейся стадии ползучести с использованием формулы (Е.29).

Параметры A_1 и Ω определяют с помощью метода наименьших квадратов путем минимизации среднеквадратичной ошибки

$$\min \sum_{k=1}^{N} \left[\left(\varepsilon_{exp}^{c} \right)_k - \left(\varepsilon_{11}^{c} \right)_k \right]^2, \tag{Е.32}$$

где ε_{exp}^{c} — экспериментальные значения деформации ползучести;

N — количество экспериментальных значений деформации ползучести.

Значения ε_{11}^{c} определяют путем численного интегрирования уравнений (Е.26), (Е.30) и (Е.31). Параметр C_1 определяют из уравнения (Е.29).

Приложение Ж
(обязательное)

Процедура формирования циклов при сложном нагружении и расчет усталостного повреждения

Ж.1 Процедура определения профиля циклического нагружения при нестационарном нагружении

Ж.1.1 Определяют профиль циклического нагружения, т. е. изменение деформации от времени во времени, в рассматриваемой зоне компонента при исследуемом режиме нагружения или группе режимов нагружения по следующей процедуре.

Ж.1.2 Рассматриваемый режим (группа режимов) нагружения разбивают на блоки таким образом, чтобы термосиловые условия нагружения (силовые нагрузки и температура) в начале и в конце блока были бы одинаковыми. Определение профиля нагружения проводят для каждого блока отдельно.

Ж.1.3 Рассчитывают эквивалентную деформацию $\varepsilon_{eq}^{(1)}(\tau)$ на первом шаге нагружения в текущий момент времени τ по формуле (используется критерий Мизеса)

$$\varepsilon_{eq}^{(1)}(\tau)=\frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)}\left(\left(\varepsilon_x(\tau)-\varepsilon_y(\tau)\right)^2+\left(\varepsilon_y(\tau)-\varepsilon_z(\tau)\right)^2+\left(\varepsilon_z(\tau)-\varepsilon_x(\tau)\right)^2+\frac{3}{2}\left(\left(\gamma_{xy}(\tau)\right)^2+\left(\gamma_{yz}(\tau)\right)^2+\left(\gamma_{zx}(\tau)\right)^2\right)\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (Ж.1)$$

где $\varepsilon_x(\tau)$, $\varepsilon_y(\tau)$, $\varepsilon_z(\tau)$, $\gamma_{xy}(\tau)$, $\gamma_{yz}(\tau)$, $\gamma_{zx}(\tau)$ — компоненты деформации в системе координат *XYZ*, рассчитанные с учетом упругой и пластической деформации и деформации ползучести;

ν — коэффициент Пуассона, $\nu = 0{,}3$.

Ж.1.4 Определяют вектор деформаций $\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{Bmatrix}^{(1)}$, соответствующий максимальному значению $\varepsilon_{eq}^{(1)}(\tau)$ при $\tau = t^{(1)}$,

и рассчитывают приращение деформации на первом шаге по формуле

$$\Delta\varepsilon^{(1)}=\max_{\tau>0}\varepsilon_{eq}^{(1)}(\tau)=\varepsilon_{eq}^{(1)}(\tau)\Big|_{\tau=t^{(1)}}, \quad (Ж.2)$$

где $t^{(1)}$ — время, при котором достигается максимальное значение $\varepsilon_{eq}^{(1)}(\tau)$.

Значению $\Delta\varepsilon^{(1)}$ присваивают знак плюс.

Ж.1.5 Рассчитывают эквивалентное приращение деформаций на втором шаге по формуле

$$\Delta\varepsilon_{eq}^{(2)}(\tau)=\frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)}\left(\left(\Delta\varepsilon_x^{(2)}(\tau)-\Delta\varepsilon_y^{(2)}(\tau)\right)^2+\left(\Delta\varepsilon_y^{(2)}(\tau)-\Delta\varepsilon_z^{(2)}(\tau)\right)^2+\left(\Delta\varepsilon_z^{(2)}(\tau)-\Delta\varepsilon_x^{(2)}(\tau)\right)^2+\frac{3}{2}\left(\left(\Delta\gamma_{xy}^{(2)}(\tau)\right)^2+\left(\Delta\gamma_{yz}^{(2)}(\tau)\right)^2+\left(\Delta\gamma_{zx}^{(2)}(\tau)\right)^2\right)\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (Ж.3)$$

где $\begin{Bmatrix}\Delta\varepsilon_x(\tau)\\ \Delta\varepsilon_y(\tau)\\ \Delta\varepsilon_z(\tau)\\ \Delta\gamma_{xy}(\tau)\\ \Delta\gamma_{yz}(\tau)\\ \Delta\gamma_{zx}(\tau)\end{Bmatrix}^{(2)}=\begin{Bmatrix}\varepsilon_x(\tau)\\ \varepsilon_y(\tau)\\ \varepsilon_z(\tau)\\ \gamma_{xy}(\tau)\\ \gamma_{yz}(\tau)\\ \gamma_{zx}(\tau)\end{Bmatrix}-\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{Bmatrix}^{(1)}$; $\tau > t^{(1)}$.

Ж.1.6 На втором шаге нагружения определяют момент времени $t^{(2)}$, при котором достигается максимум $\Delta\varepsilon_{eq}^{(2)}(\tau)$, и соответствующий этому моменту времени вектор приращений деформаций $\left\{\begin{matrix}\Delta\varepsilon_x\\ \Delta\varepsilon_y\\ \Delta\varepsilon_z\\ \Delta\gamma_{xy}\\ \Delta\gamma_{yz}\\ \Delta\gamma_{zx}\end{matrix}\right\}^{(2)}$ и приращение деформации $\Delta\varepsilon^{(2)}$ по формуле

$$\Delta\varepsilon^{(2)} = \max_{\tau>t^2} \Delta\varepsilon_{eq}^{(2)}(\tau) = \Delta\varepsilon_{eq}^{(2)}(\tau)\Big|_{\tau=t^{(2)}}. \qquad (Ж.4)$$

Значению $\Delta\varepsilon^{(2)}$ присваивают знак минус.

Ж.1.7 Определяют вектор деформаций, отвечающий концу второго шага нагружения (моменту времени $t^{(2)}$), по формуле

$$\left\{\begin{matrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{matrix}\right\}^{(2)} = \left\{\begin{matrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{matrix}\right\}^{(1)} + \left\{\begin{matrix}\Delta\varepsilon_x\\ \Delta\varepsilon_y\\ \Delta\varepsilon_z\\ \Delta\gamma_{xy}\\ \Delta\gamma_{yz}\\ \Delta\gamma_{zx}\end{matrix}\right\}^{(2)}. \qquad (Ж.5)$$

Ж.1.8 Расчет $\Delta\varepsilon_{eq}^{(n)}$ для n-го шага нагружения выполняют аналогично Ж.1.5—Ж.1.7.

Рассчитывают эквивалентное приращение деформаций по формуле

$$\Delta\varepsilon_{eq}^{(n)}(\tau) = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)}\left(\left(\Delta\varepsilon_x^{(n)}(\tau) - \Delta\varepsilon_y^{(n)}(\tau)\right)^2 + \left(\Delta\varepsilon_y^{(n)}(\tau) - \Delta\varepsilon_z^{(n)}(\tau)\right)^2 + \left(\Delta\varepsilon_z^{(n)}(\tau) - \Delta\varepsilon_x^{(n)}(\tau)\right)^2 + \frac{3}{2}\left(\left(\Delta\gamma_{xy}^{(n)}(\tau)\right)^2 + \left(\Delta\gamma_{yz}^{(n)}(\tau)\right)^2 + \left(\Delta\gamma_{zx}^{(n)}(\tau)\right)^2\right)\right)^{\frac{1}{2}}, \qquad (Ж.6)$$

где $\left\{\begin{matrix}\Delta\varepsilon_x(\tau)\\ \Delta\varepsilon_y(\tau)\\ \Delta\varepsilon_z(\tau)\\ \Delta\gamma_{xy}(\tau)\\ \Delta\gamma_{yz}(\tau)\\ \Delta\gamma_{zx}(\tau)\end{matrix}\right\}^{(n)} = \left\{\begin{matrix}\varepsilon_x(\tau)\\ \varepsilon_y(\tau)\\ \varepsilon_z(\tau)\\ \gamma_{xy}(\tau)\\ \gamma_{yz}(\tau)\\ \gamma_{zx}(\tau)\end{matrix}\right\} - \left\{\begin{matrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{matrix}\right\}^{(n-1)}$; $\tau > t^{(n-1)}$;

$\left\{\begin{matrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{zx}\end{matrix}\right\}^{(n-1)}$ — вектор деформаций, отвечающий концу $(n-1)$ шага нагружения.

Ж.1.9 На n-м шаге нагружения определяют момент времени $t^{(n)}$, при котором достигается максимум $\Delta\varepsilon_{eq}^{(n)}(\tau)$, и соответствующий этому моменту времени вектор приращений деформаций $\left\{\begin{matrix}\Delta\varepsilon_x\\ \Delta\varepsilon_y\\ \Delta\varepsilon_z\\ \Delta\gamma_{xy}\\ \Delta\gamma_{yz}\\ \Delta\gamma_{zx}\end{matrix}\right\}^{(n)}$ и приращение деформации $\Delta\varepsilon^{(n)}$ по формуле

$$\Delta\varepsilon^{(n)} = (-1)^{n-1}\max_{\tau>t^{(n-1)}} \Delta\varepsilon_{eq}^{(n)}(\tau) = (-1)^{n-1}\Delta\varepsilon_{eq}^{(n)}(\tau)\Big|_{\tau=t^{(n)}}. \qquad (Ж.7)$$

Ж.1.10 Определяют вектор деформаций, отвечающий концу n-го шага, по формуле

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}^{(n)} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix}^{(n-1)} + \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\gamma_{yz} \\ \Delta\gamma_{zx} \end{Bmatrix}^{(n)}. \quad (Ж.8)$$

Примечание — При определении кинетики компоненты деформаций система координат должна быть зафиксирована.

Ж.1.11 Строят профиль циклического нагружения, то есть зависимость $\varepsilon^{(n)}$ от номера шага нагружения в соответствии с формулой

$$\varepsilon^{(n)} = \varepsilon^{(n-1)} + \Delta\varepsilon^{(n)}. \quad (Ж.9)$$

При этом принимают, что в начальный момент рассматриваемого блока нагружения и в конечный момент $\varepsilon = 0$, т. е.

$$\varepsilon^{(0)} = \varepsilon^{(N_t)} = 0, \quad (Ж.10)$$

где N_t — последний шаг рассматриваемого блока нагружения.

Ж.2 Формирование циклов нагружения по методу «стока»

Ж.2.1 Формирование циклов нагружения, то есть определение размахов деформаций, скорости деформирования и количества циклов, проводят для каждого блока нагружения отдельно на основании зависимости $\varepsilon^{(n)}$.

Ж.2.2 Циклы нагружения при нестационарном нагружении формируют по методу «стока» («дождя»), алгоритм которого представлен ниже. Блок-схема данного алгоритма представлена на рисунке Ж.1.

Ж.2.3 Алгоритм определения размахов деформаций $\Delta\varepsilon$, цикла (полуцикла) N с размахом деформаций $\Delta\varepsilon$ и количества циклов нагружения K по методу «стока» состоит в следующем.

Используемые обозначения:

X — размах деформации на текущем шаге;

Y — предыдущий размах, примыкающий к размаху деформации X;

S — точка старта в истории (начальное значение $S = a$);

N — цикл (полуцикл) с размахом деформаций $\Delta\varepsilon$ ($N = 1$ или $N = 0{,}5$);

K — количество циклов нагружения (количество точек максимума или минимума).

1) Определяют текущую точку (a, b или c) максимума или минимума на основании данных зависимости $\varepsilon^{(n)}$. Если больше данных нет, то переход на шаг 6).

2) Если определено менее трех точек, то переход на шаг 1). Иначе, формируют размахи X и Y, используя три определенные точки (a, b и c) максимумов и минимумов: $Y = |\varepsilon^{(a)} - \varepsilon^{(b)}|$; $X = |\varepsilon^{(b)} - \varepsilon^{(c)}|$.

3) Сопоставляют абсолютные значения размахов X и Y.

Если $X < Y$, то переход на шаг 1).

Если $X \geq Y$, то переход на шаг 4).

4) Если размах Y содержит точку старта S, то переход на шаг 5). Иначе, размах Y считают как один цикл ($N = 1$); точки максимума и минимума размаха Y исключают из рассмотрения и далее переход на шаг 2).

5) Размах Y считают как полуцикл ($N = 0{,}5$); исключают первую точку в размахе Y (минимум или максимум); точку старта S перемещают на вторую точку размаха Y ($S = b$); далее переход на шаг 2).

6) Каждый размах, который не был учтен, считают как полуцикл ($N = 0{,}5$).

Ж.2.4 Пример порядка расчета размахов деформаций $\Delta\varepsilon$, цикла (полуцикла) N с размахом деформаций $\Delta\varepsilon$ и количества циклов нагружения K, в соответствии с Ж.2.3 для зависимости $\varepsilon^{(n)}$, представленной на рисунке Ж.2, приведен ниже.

1. $S = a$; $Y = |\varepsilon^{(a)} - \varepsilon^{(b)}|$; $X = |\varepsilon^{(b)} - \varepsilon^{(c)}|$; $X > Y$. Y содержит точку S, т. е. точку a. Считают $|\varepsilon^{(a)} - \varepsilon^{(b)}|$ как полуцикл и исключают точку a; $S = b$.
2. $Y = |\varepsilon^{(b)} - \varepsilon^{(c)}|$; $X = |\varepsilon^{(c)} - \varepsilon^{(d)}|$; $X < Y$.
3. $Y = |\varepsilon^{(c)} - \varepsilon^{(d)}|$; $X = |\varepsilon^{(d)} - \varepsilon^{(e)}|$; $X > Y$. Считают $|\varepsilon^{(c)} - \varepsilon^{(d)}|$ как один цикл и исключают точки c и d. Цикл формируют парой размахов $|\varepsilon^{(c)} - \varepsilon^{(d)}|$ и частью $|\varepsilon^{(d)} - \varepsilon^{(e)}|$.
4. $Y = |\varepsilon^{(b)} - \varepsilon^{(e)}|$; $X = |\varepsilon^{(e)} - \varepsilon^{(f)}|$; $Y > X$.
5. $Y = |\varepsilon^{(e)} - \varepsilon^{(f)}|$; $X = |\varepsilon^{(f)} - \varepsilon^{(g)}|$; $Y > X$.

6. $Y = |\varepsilon^{(f)} - \varepsilon^{(g)}|$; $X = |\varepsilon^{(g)} - \varepsilon^{(h)}|$; $X > Y$. Считают $|\varepsilon^{(f)} - \varepsilon^{(g)}|$ как один цикл и исключают точки *f* и *g*. Цикл формируют парой размахов $|\varepsilon^{(f)} - \varepsilon^{(g)}|$ и частью $|\varepsilon^{(e)} - \varepsilon^{(f)}|$.

7. $Y = |\varepsilon^{(b)} - \varepsilon^{(e)}|$; $X = |\varepsilon^{(e)} - \varepsilon^{(h)}|$; $X > Y$. *Y* содержит точку *S*, т. е. точку *b*. Считают $|\varepsilon^{(b)} - \varepsilon^{(e)}|$ как полуцикл и исключают точку *b*; *S* = *e*.

8. $Y = |\varepsilon^{(e)} - \varepsilon^{(h)}|$; $X = |\varepsilon^{(h)} - \varepsilon^{(i')}|$; $Y > X$. Больше данных нет.

9. Считают $|\varepsilon^{(e)} - \varepsilon^{(h)}|$ как полуцикл, $|\varepsilon^{(h)} - \varepsilon^{(i')}|$ считают как полуцикл.

10. Конец расчета.

Результаты данного расчета приведены в таблице Ж.1.

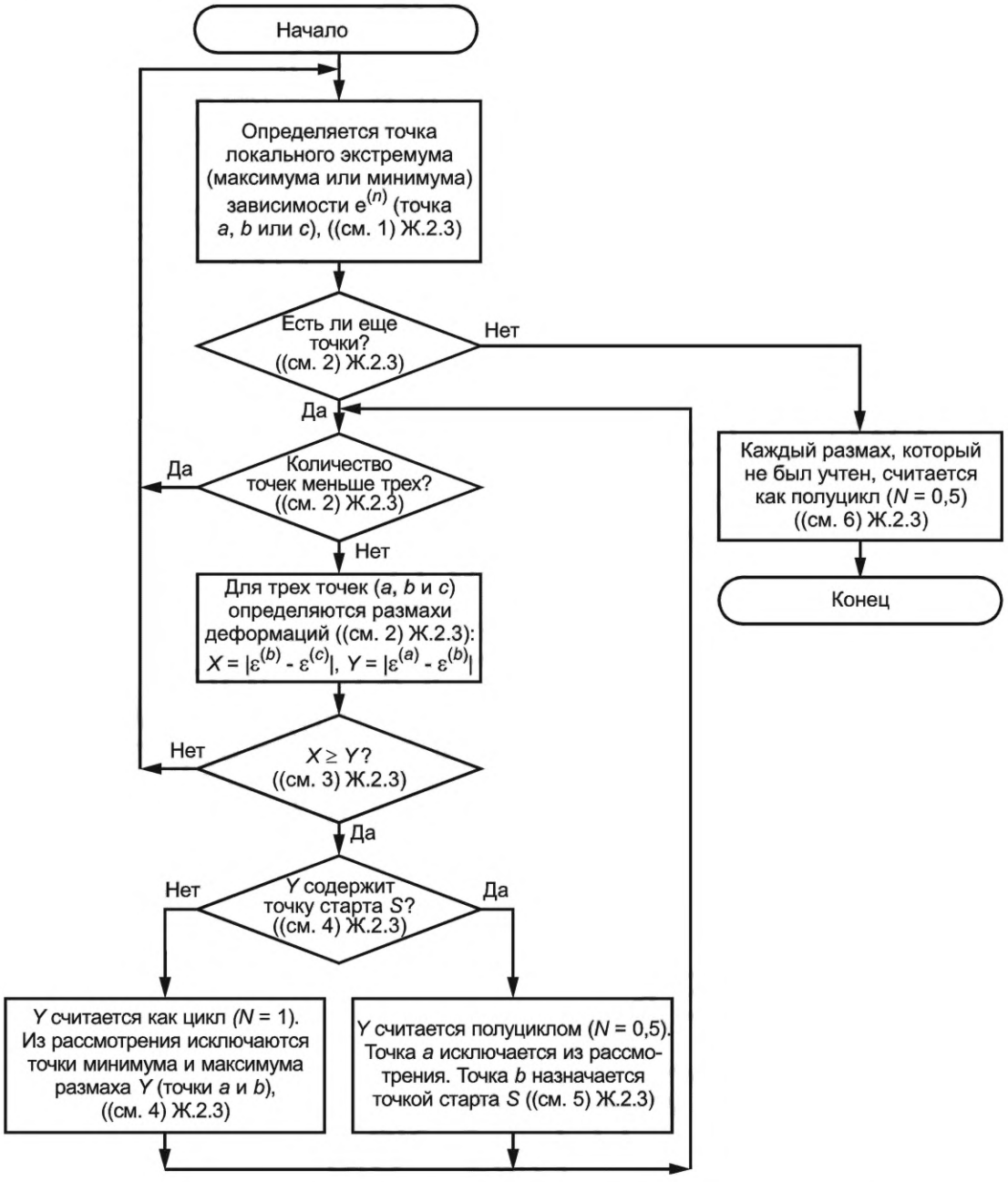


Рисунок Ж.1 — Блок-схема алгоритма метода «стока» (метод «дождя»)

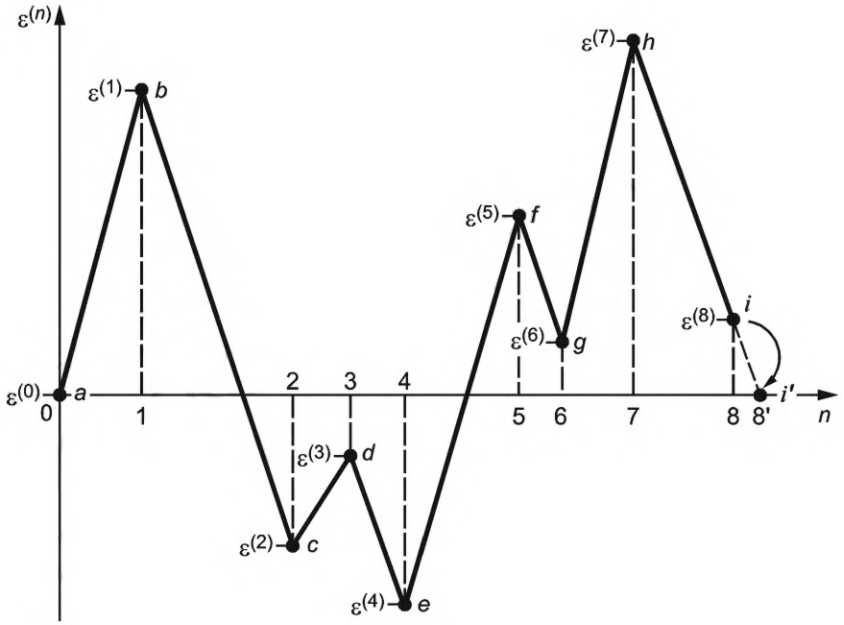


Рисунок Ж.2 — Зависимость $\varepsilon^{(n)}$ от номера шага нагружения и применение метода «стока» для определения размахов деформаций $\Delta\varepsilon$, цикла (полуцикла) N с размахом деформаций $\Delta\varepsilon$ и при общем количестве циклов нагружения $K = 6$

Примечание — На рисунке Ж.2 расчетное значение $\varepsilon^{(8)}$ соответствует $n = 8$, принятое значение $\varepsilon^{(8)} = 0$ соответствует $n = 8'$.

Таблица Ж.1 — Размах деформаций $\Delta\varepsilon$, цикл (полуцикл) N с размахом деформации $\Delta\varepsilon$ и количество циклов нагружения K от шага нагружения k для зависимости $\varepsilon^{(n)}$ (см. рисунок Ж.2)

k	$\Delta\varepsilon_k$	N_k	K
1	$\lvert\varepsilon^{(a)} - \varepsilon^{(b)}\rvert = \lvert 0 - \varepsilon^{(1)}\rvert$	0,5	—
2	$\lvert\varepsilon^{(c)} - \varepsilon^{(d)}\rvert = \lvert\varepsilon^{(2)} - \varepsilon^{(3)}\rvert$	1	—
3	$\lvert\varepsilon^{(f)} - \varepsilon^{(g)}\rvert = \lvert\varepsilon^{(5)} - \varepsilon^{(6)}\rvert$	1	—
4	$\lvert\varepsilon^{(b)} - \varepsilon^{(e)}\rvert = \lvert\varepsilon^{(1)} - \varepsilon^{(4)}\rvert$	0,5	—
5	$\lvert\varepsilon^{(e)} - \varepsilon^{(h)}\rvert = \lvert\varepsilon^{(4)} - \varepsilon^{(7)}\rvert$	0,5	—
6	$\lvert\varepsilon^{(h)} - \varepsilon^{(i')}\rvert = \lvert\varepsilon^{(7)} - 0\rvert$	0,5	6

Ж.3 Расчет усталостного повреждения

Ж.3.1 Процедура расчета усталостного повреждения с одной стороны учитывает увеличение повреждения за счет приоритетного рассмотрения циклов с наибольшим размахом деформаций, а с другой стороны — учитывает изменение температуры и скорости деформирования при переходе от полуцикла к полуциклу.

Ж.3.2 Весь период нагружения рассматривают как совокупность полуциклов, характеризующуюся размахом деформаций, скоростью деформирования и температурой.

На первом этапе проводят вычисление повреждения $D_{\text{сток}}$ по методу «стока» и повреждения $D_{\text{полуцикл}}$, рассчитываемого на основе рассмотрения нагружения как совокупности полуциклов. Расчет повреждений проводят при таких скоростях деформирования и температуре, при которых они не будут оказывать влияние на повреждения $D_{\text{сток}}$ и $D_{\text{полуцикл}}$.

На втором этапе проводят вычисление коэффициента k_D, который учитывает более консервативную оценку повреждения, рассчитанного по методу «стока» по отношению к повреждению, рассчитанному как сумма повреждений на каждом полуцикле.

На третьем этапе проводят вычисление повреждения на каждом полуцикле с учетом влияния скорости деформирования и температуры и с использованием коэффициента k_D.

Ж.3.3 Расчет повреждения $D_{сток}$ проводят с использованием циклов, сформированных по методу «стока» согласно Ж.2, по формуле

$$D_{сток} = \sum_{k=1}^{K} \frac{N_k}{[N_{f,k}]}, \quad (Ж.11)$$

где N_k — количество циклов, рассчитываемое согласно Ж.2.3;

$[N_{f,k}]$ — допускаемое количество циклов, определяемое по кривой усталости при размахе деформаций $\Delta\varepsilon_k$, определяемом согласно Ж.2, максимальной скорости деформирования ξ_k за весь рассматриваемый период эксплуатации и минимальной температуре эксплуатации T.

Ж.3.4 Рассчитывают повреждение $D_{полуцикл}$ при рассмотрении нагружения как совокупности полуциклов, сформированных согласно Ж.3.7, по формуле

$$D_{полуцикл} = 0{,}5\sum_{n=1}^{L} \frac{1}{[N_{f,n}]}, \quad (Ж.12)$$

где L — количество полуциклов нагружения на рассматриваемом периоде эксплуатации, определяемое согласно Ж.3.7;

$[N_{f,n}]$ — допускаемое количество циклов, определяемое по кривой усталости при размахе деформаций $\Delta\varepsilon_n$, рассчитываемом согласно Ж.3.7, максимальной скорости деформирования ξ_n за весь период эксплуатации и минимальной температуре эксплуатации T.

Ж.3.5 Рассчитывают поправочный коэффициент k_D, учитывающий более консервативную оценку повреждения по методу «стока» по отношению к повреждению, рассчитанному согласно Ж.3.4, по формуле

$$k_D = \frac{D_{сток}}{D_{полуцикл}}. \quad (Ж.13)$$

Ж.3.6 Повреждение за весь рассматриваемый период нагружения рассчитывают по формуле

$$D_N = 0{,}5k_D\sum_{n=1}^{L} \frac{1}{[N_{f,n}]}. \quad (Ж.14)$$

Расчет допускаемого количества циклов $[N_{f,n}]$ проводят по кривой усталости при размахе деформаций $\Delta\varepsilon_n$, рассчитанном согласно Ж.3.7, с учетом влияния скорости деформирования ξ_n, рассчитанной согласно Ж.3.8, и температуры T, соответствующей максимальной температуре в n-м полуцикле.

Ж.3.7 Размах деформации $\Delta\varepsilon_n$ n-го полуцикла рассчитывают с использованием зависимости $\varepsilon^{(n)}$, сформированной согласно Ж.1, по формуле

$$\Delta\varepsilon_n = |\varepsilon^{(n)} - \varepsilon^{(n-1)}|, \; n = 1, \ldots, L, \quad (Ж.15)$$

где $\Delta\varepsilon_n$ — размах деформации в n-м полуцикле;

L — количество полуциклов нагружения.

Ж.3.8 Скорость деформирования ξ_n в n-м полуцикле рассчитывают по формуле

$$\xi_n = \frac{\Delta\varepsilon_n}{\Delta t_n}, \quad (Ж.16)$$

где Δt_n — длительность n-го полуцикла, $\Delta t_n = t^{(n)} - t^{(n-1)}$;

$t^{(n)}$ — значение времени, соответствующее значению $\varepsilon^{(n)}$.

Примечание — При определении значения Δt_n не учитывают время работы компонента на стационарном режиме.

Приложение И
(рекомендуемое)

Расчетные кривые усталости

И.1 Общие положения

Кривые усталости (кривые сопротивления усталостному разрушению) представляют собой зависимость допускаемого размаха деформации от допускаемого числа циклов, где допускаемый размах деформации в общем случае зависит от скорости деформирования (для температур $T > T_t$) и температуры.

Для температур $T > T_t$ расчет проводят согласно И.2, для температур $T \le T_t$ расчет проводят согласно И.3.

И.2 Расчет кривых усталости при температуре T, превышающей T_t

Расчет кривых усталости проводят по формуле

$$\Delta\varepsilon = \min\begin{cases}\dfrac{\varepsilon_{f\xi}\left(4[N_f]\right)^{-m}}{n_\varepsilon} + \dfrac{2R_c}{n_\varepsilon E^T\left(4[N_f]\right)^{m_e}} \\ \varepsilon_{f\xi}\left(4n_N[N_f]\right)^{-m} + \dfrac{2R_c}{E^T\left(4n_N[N_f]\right)^{m_e}}\end{cases}, \qquad (И.1)$$

где R_c — характеристика прочности материала;

$\Delta\varepsilon$ — допускаемый размах деформаций;

$[N_f]$ — допускаемое количество циклов при размахе деформаций $\Delta\varepsilon$;

m, m_e — характеристики материала;

$\varepsilon_{f\xi}$ — деформация разрушения;

n_ε, n_N — коэффициенты запаса по размаху деформации и числу циклов соответственно.

Показатель степени m_e вычисляют по формуле

$$m_e = 0{,}1321 \cdot \lg\left[\frac{R_m^T}{R_{-1}^T}\left(1 + 1{,}4 \cdot 10^{-2} \cdot Z^T\right)\right], \qquad (И.2)$$

где R_{-1}^T — предел выносливости.

Значения характеристик E^T, R_m^T и Z^T для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3, 07Х12НМФБ следует принимать согласно приложению А, для остальных материалов — согласно ГОСТ Р 59115.3.

Значения R_{-1}^T и показателя степени m следует принимать по таблице И.1.

Коэффициенты запаса прочности n_ε и n_N следует принимать равными 2 и 10 соответственно.

Таблица И.1 — Значения характеристик R_{-1}^T и m

Характеристика	$R_m^T \le 700$, МПа	$700 < R_m^T \le 1200$, МПа
R_{-1}^T	$0{,}4R_m^T$	$(0{,}54 - 2 \cdot 10^{-4} R_m^T)R_m^T$
m	0,5	$0{,}36 - 2 \cdot 10^{-4}R_m^T$

Значения характеристик E^T, R_m^T и Z^T в расчетах следует принимать равными их наименьшим значениям в интервале рабочих температур рассматриваемого периода нагружения с учетом повреждающей дозы и скорости набора повреждающей дозы при нейтронном облучении.

Значение $\varepsilon_{f\xi}$ определяют по формуле

$$\varepsilon_{f\xi} = \min\begin{cases}\varepsilon_{ft}^T(\xi) \\ \varepsilon_f \\ 0{,}69\end{cases}, \qquad (И.3)$$

где $\varepsilon_{ft}^T(\xi)$ — зависимость деформации разрушения при испытаниях на длительную прочность от средней скорости деформирования ξ в цикле.

Значения ε_f для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3, 07Х12НМФБ следует вычислять в соответствии с приложением А.

Допускают рассчитывать ε_f по формуле

$$\varepsilon_f = -\ln\left(1-\frac{Z^T}{100}\right), \quad (И.4)$$

где значения Z^T следует принимать согласно ГОСТ Р 59115.3.

Зависимость $\varepsilon_{fl}^T(\xi)$ строят посредством перестроения зависимости $\varepsilon_{fl}^T(t_f)$, где вместо координаты t_f используют координату $\xi = \frac{\varepsilon_{fl}^T}{t_f}$. Значения ε_{fl}^T и t_f принимают согласно ГОСТ Р 59115.4—2021 (раздел 5, приложение А).

Зависимость $\varepsilon_{fl}^T(\xi)$ для сталей *марок* 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 принимают по ГОСТ Р 59115.4.

Допустимо определять ε_{fl}^T по формуле

$$\varepsilon_{fl}^T = -\ln\left(1-\frac{Z_t^T}{100}\right), \quad (И.5)$$

где значения Z_t^T принимают по ГОСТ Р 59115.4.

Значения характеристик ε_f, ε_{fl}^T и Z_t^T в расчетах следует принимать равными их наименьшим значениям в интервале рабочих температур рассматриваемого периода нагружения с учетом повреждающей дозы и скорости набора повреждающей дозы при нейтронном облучении.

Характеристику прочности материала R_c определяют по формуле

$$R_c = \min\begin{cases}\bar{R}_c^T(\xi)\\ \sigma_f\end{cases}, \text{ МПа}. \quad (И.6)$$

Значения σ_f определяют при кратковременных испытаниях на растяжение.

Допускается определять σ_f по формуле

$$\sigma_f = \bar{R}_m \cdot \left[1+1{,}4\left(1-e^{-\varepsilon_f}\right)\right], \text{ МПа}. \quad (И.7)$$

Значения $\bar{R}_m$ для сталей *марок* 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3, 07Х12НМФБ следует вычислять в соответствии с приложением А.

Допускается в формуле (И.7) вместо $\bar{R}_m$ использовать значения R_m^T, где R_m^T принимают согласно ГОСТ Р 59115.3.

Зависимость $\bar{R}_c^T(\xi)$ строят посредством перестроения зависимости $\bar{R}_c^T(t_f)$, где вместо координаты t_f используют координату $\xi = \frac{\varepsilon_{fl}^T(t)}{t_f}$. Значения $\bar{R}_c^T(t_f)$ и $\varepsilon_{fl}^T(t_f)$ принимают по зависимостям средних значений истинного предела длительной прочности и длительной пластичности согласно ГОСТ Р 59115.4.

Зависимость $\bar{R}_c^T(\xi)$ для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 принимают по ГОСТ Р 59115.4.

Допускается определять значения $\bar{R}_c^T(t_f)$ по формуле

$$\bar{R}_c^T = \frac{\bar{R}_{mt}^T}{1-\frac{Z_t^T}{100}}. \quad (И.8)$$

Значения $\bar{R}_{mt}^T$ и Z_t^T принимают согласно ГОСТ Р 59115.4.

Значения характеристик R_m^T, σ_f, $\bar{R}_c^T$ и $\bar{R}_{mt}^T$ в расчетах следует принимать равными их наименьшим значениям в интервале рабочих температур рассматриваемого периода нагружения.

И.3 Расчет кривых усталости при температуре *T*, не превышающей температуру T_t

И.3.1 Расчет кривых усталости проводят по формуле

$$\Delta\varepsilon = \min\begin{cases}\dfrac{\varepsilon_f\left(4[N_f]\right)^{-m}}{n_\varepsilon} + \dfrac{2R_c}{n_\varepsilon E^T\left(\left(4[N_f]\right)^{m_e}+\dfrac{1+r}{1-r}\right)}\\ \varepsilon_f\left(4n_N[N_f]\right)^{-m} + \dfrac{2R_c}{E^T\left(\left(4n_N[N_f]\right)^{m_e}+\dfrac{1+r}{1-r}\right)}\end{cases}, \quad (И.9)$$

где ε_f — деформация разрушения при кратковременных испытаниях при растяжении;

r — коэффициент асимметрии цикла напряжений, $r = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$.

И.3.2 Допускают проводить расчет кривых усталости без коэффициента асимметрии цикла (рассматривается случай максимальной асимметрии цикла) по формулам:

$$\Delta\varepsilon_{n_\varepsilon} = \begin{cases} \dfrac{\varepsilon_f\left(4[N_f]\right)^{-m}}{n_\varepsilon} + \dfrac{2R_c}{n_\varepsilon E^T\left(\left(4[N_f]\right)^{m_\theta} + \dfrac{2R^T_{p0,2} - n_\varepsilon\Delta\varepsilon_{n_\varepsilon}E^T}{n_\varepsilon\Delta\varepsilon_{n_\varepsilon}E^T}\right)}, \text{ если } 2R^T_{p0,2} - n_\varepsilon\Delta\varepsilon_{n_\varepsilon}E^T > 0 \\ \dfrac{\varepsilon_f\left(4[N_f]\right)^{-m}}{n_\varepsilon} + \dfrac{2R_c}{n_\varepsilon E^T\left(4[N_f]\right)^{m_\theta}}, \text{ если } 2R^T_{p0,2} - n_\varepsilon\Delta\varepsilon_{n_\varepsilon}E^T \le 0 \end{cases}; \quad (И.10)$$

$$\Delta\varepsilon_{n_N} = \begin{cases} \varepsilon_f\left(4n_N[N_f]\right)^{-m} + \dfrac{2R_c}{E^T\left(\left(4n_N[N_f]\right)^{m_\theta} + \dfrac{2R^T_{p0,2} - \Delta\varepsilon_{n_N}E^T}{\Delta\varepsilon_{n_N}E^T}\right)}, \text{ если } 2\overline{R}_{p0,2} - \Delta\varepsilon_{n_N}E^T > 0 \\ \varepsilon_f\left(4n_N[N_f]\right)^{-m} + \dfrac{2R_c}{E^T\left(4n_N[N_f]\right)^{m_\theta}}, \text{ если } 2R^T_{p0,2} - \Delta\varepsilon_{n_N}E^T \le 0 \end{cases}; \quad (И.11)$$

$$\Delta\varepsilon = \min\begin{cases}\Delta\varepsilon_{n_\varepsilon},\\ \Delta\varepsilon_{n_N}.\end{cases} \quad (И.12)$$

В формулах (И.9)—(И.11) $R_c = \sigma_f$, где σ_f рассчитывают по формуле (И.7).

Если $\varepsilon_f > 0{,}69$, то следует принимать $\varepsilon_f = 0{,}69$.

И.4 Кривые усталости для металла шва рассчитывают по формуле

$$\Delta\varepsilon^W = \varphi_S\,\Delta\varepsilon, \quad (И.13)$$

где φ_S — коэффициент снижения циклической прочности, принимаемый согласно ГОСТ Р 59115.9;

$\Delta\varepsilon$ — допускаемый размах деформаций, рассчитанный согласно И.2 или И.3 для основного металла.

Приложение К
(рекомендуемое)

Процедура расчета референсного напряжения для вычисления *C**-интеграла

В выбранном для оценки сечении компонента, в котором расположен дефект или предполагается его наличие (плоскость дефекта лежит в плоскости сечения), расчетным или аналитическим методом определяют распределение напряжений $\sigma_n(x,t)$, нормальных к плоскости сечения в момент времени t (см. рисунки К.1 и К.2). В расчетах учитывают как механические, так и вторичные нагрузки. Расчет НДС компонента проводят без дефекта.

Полученное в расчете произвольного вида напряжение $\sigma_n(x,t)$ представляют в текущий момент времени в виде мембранной и изгибной составляющих и аппроксимируют вдоль оси x на отрезке от $x = -h/2$ до $x = a - h/2$ (a — глубина трещины) формулой

$$\sigma_n(x) = \sigma_m - \sigma_b \cdot \left(2\frac{x}{h}\right), \tag{К.1}$$

где σ_m, σ_b — константы, значения которых определяются методом наименьших квадратов.

Референсное напряжение определяют по формуле

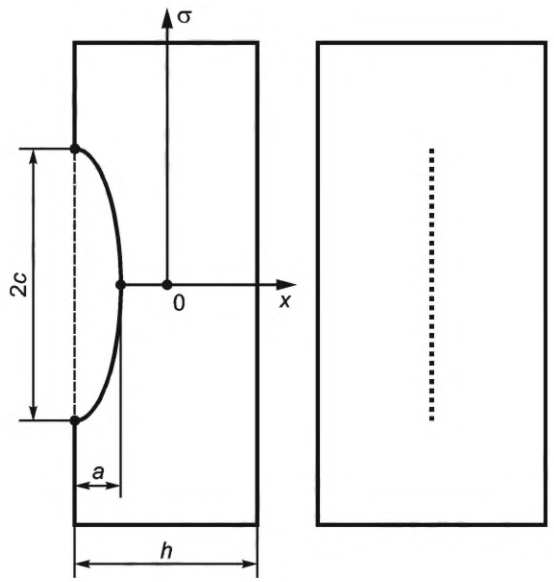
$$\sigma_{ref} = \frac{(1-\xi)^{1,58} \cdot \frac{\sigma_b}{3} + \sqrt{(1-\xi)^{3,16} \cdot \frac{\sigma_b^2}{9} + (1-\xi)^{3,14} \cdot \sigma_m^2}}{(1-\xi)^2}, \tag{К.2}$$

где $\xi = \dfrac{a \cdot c}{h \cdot (c+h)}$.

Если $\sigma_m < 0$, то принимают $\sigma_m = 0$.
Если $\sigma_b < 0$, то принимают $\sigma_b = 0$.

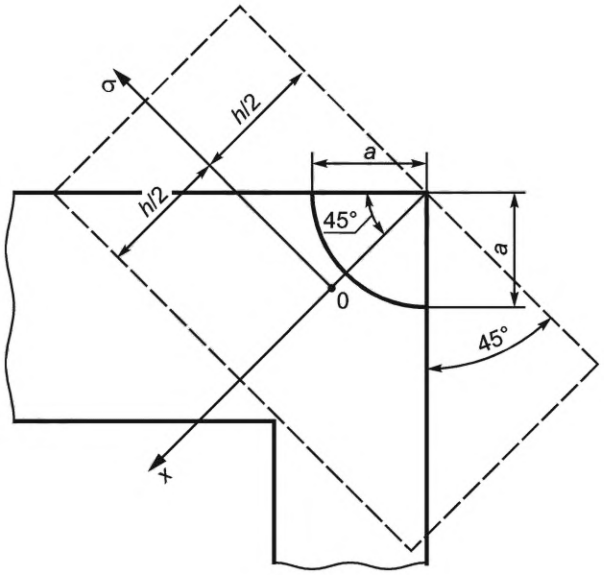
Примечание — Расчет по формуле (К.2) допускают проводить при изменении a/h от 0 до 0,8.

В случае четвертьэллиптической трещины в формуле (К.2) размер h определяют согласно рисунку К.2 и принимают, что $c = a$.



a — глубина трещины; $2c$ — длина оси полуэллиптической трещины; h — толщина

Рисунок К.1 — Полуэллиптическая поверхностная трещина



a — глубина трещины; *h* — расчетный параметр

Рисунок К.2 — Четвертьэллиптическая поверхностная трещина

Приложение Л
(рекомендуемое)

Процедура расчета референсного напряжения для анализа потери несущей способности компонента

Л.1 Выбор схемы расчета референсного напряжения

При выборе схемы расчета референсного напряжения σ_{ref} следует учитывать геометрические характеристики рассматриваемого компонента и принимать во внимание соотношение среднего радиуса r_m цилиндрической поверхности стенки компонента и его толщины h. При $r_m/h \geq 20$ референсное напряжение σ_{ref} рассчитывают на основании расчетной схемы полуэллиптической или четвертьэллиптической поверхностной трещины в пластине. При $r_m/h < 20$ референсное напряжение σ_{ref} рассчитывают в зависимости от предполагаемой ориентации дефекта: по схеме внутренней полуэллиптической поверхностной трещины в диаметральной плоскости цилиндра или по схеме внутренней полуэллиптической или четвертьэллиптической поверхностной трещины по образующей цилиндра.

В расчетах учитывают только механические нагрузки. Расчет НДС компонента проводят без дефекта.

Л.2 Полуэллиптическая поверхностная трещина в пластине

В выбранном для оценки сечении компонента, в котором расположен дефект или предполагается его наличие (плоскость дефекта лежит в плоскости сечения), расчетным или аналитическим методом определяют распределение напряжений $\sigma_n(x,t)$ нормальных к плоскости сечения в момент времени t (см. рисунок Л.1).

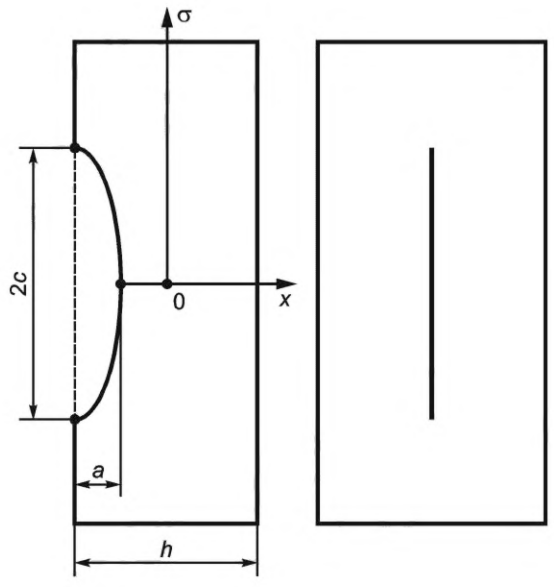
Полученное в расчете произвольного вида распределение напряжения $\sigma_n(x,t)$ представляют в текущий момент времени t в виде мембранной и изгибной составляющих, вычисляемых по формулам (Л.1) и (Л.2) (см. рисунок Л.2).

Мембранное напряжение рассчитывают по формуле

$$\sigma_m = \frac{1}{h}\int_{-h/2}^{h/2}\sigma(x)\cdot dx\,. \qquad (Л.1)$$

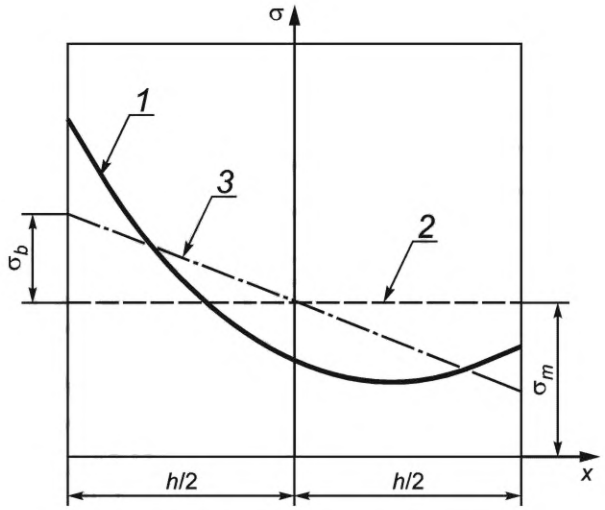
Максимальное изгибное напряжение рассчитывают по формуле

$$\sigma_b = \frac{6}{h^2}\int_{-h/2}^{h/2}\sigma(x)\cdot x\cdot dx\,. \qquad (Л.2)$$



a — глубина трещины; $2c$ — длина оси полуэллиптической трещины; h — толщина

Рисунок Л.1 — Полуэллиптическая поверхностная трещина в пластине



1 — напряжение σ_n; *2* — мембранная составляющая σ_m; *3* — изгибная составляющая σ_b

Рисунок Л.2 — Распределение по толщине стенки напряжения σ_n и его мембранной σ_m и изгибной σ_b составляющих

Таким образом, общее (нормальное) напряжение представляют в виде формулы

$$\sigma_n(x) = \sigma_m - \sigma_b \cdot \left(2\frac{x}{h}\right). \quad (Л.3)$$

Референсное напряжение определяют по формуле

$$\sigma_{ref} = \frac{(1-\xi)^{1,58} \cdot \frac{\sigma_b}{3} + \sqrt{(1-\xi)^{3,16} \cdot \frac{\sigma_b^2}{9} + (1-\xi)^{3,14} \cdot \sigma_m^2}}{(1-\xi)^2}, \quad (Л.4)$$

где $\xi = \frac{a \cdot c}{h \cdot (c+h)}$.

Если $\sigma_m < 0$, то принимают $\sigma_m = 0$.

Если $\sigma_b < 0$, то принимают $\sigma_b = 0$.

Примечание — Расчет по формуле (Л.4) допускают проводить при изменении *a/h* от 0 до 0,8.

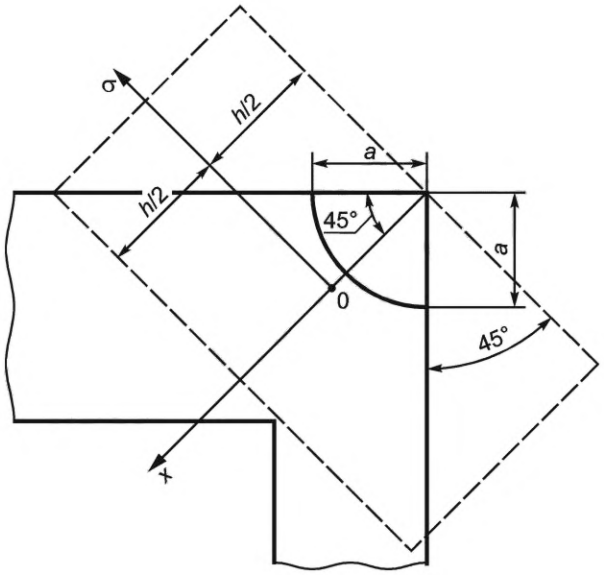
Л.3 Внутренняя четвертьэллиптическая поверхностная трещина в узле, образованном двумя пластинами

При рассмотрении четвертьэллиптической трещины принимают, что малая и большая полуось эллипса равны между собой.

В выбранном для оценки сечении компонента, в котором расположен дефект или предполагают его наличие (плоскость дефекта лежит в плоскости сечения), расчетным или аналитическим методом определяют распределение напряжений $\sigma_n(x,t)$, нормальных к плоскости сечения в момент времени *t* (см. рисунок Л.3).

Полученное в расчете произвольного вида распределение напряжения $\sigma_n(x,t)$ представляют в текущий момент времени *t* в виде мембранной и изгибной составляющих, вычисляемых по формулам (Л.1) и (Л.2), (см. рисунок Л.2).

Референсное напряжение рассчитывают по формуле (Л.4) при условии, что *h* определяют из рисунка Л.3 и *c* = *a*.



ось *X* — координата, по которой задается распределение нормальных к трещине напряжений;
a — глубина трещины

Рисунок Л.3 — Четвертьэллиптическая поверхностная трещина в узле, образованном двумя пластинами, и схематизация расчетного параметра *h*

Л.4 Внутренняя полуэллиптическая поверхностная трещина, расположенная в диаметральной плоскости цилиндра

Геометрическая схема конструкции, дефекта и нагрузок приведена на рисунке Л.4.

Референсное напряжение определяют по формуле

$$\sigma_{ref} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{s'_M}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{bg}}{s'_{bg}}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{s_M}{s'_M}\right)^2 + \left(\frac{s_{bg}}{s'_{bg}}\right)^2}}, \qquad (Л.5)$$

где σ_m, σ_{bg} соответственно мембранные и глобальные изгибные напряжения;

$$\sigma_m = \frac{N}{S_{тр}};$$

$$\sigma_{bg} = \frac{M}{W_{тр}},$$

где N — осевое усилие, Н;

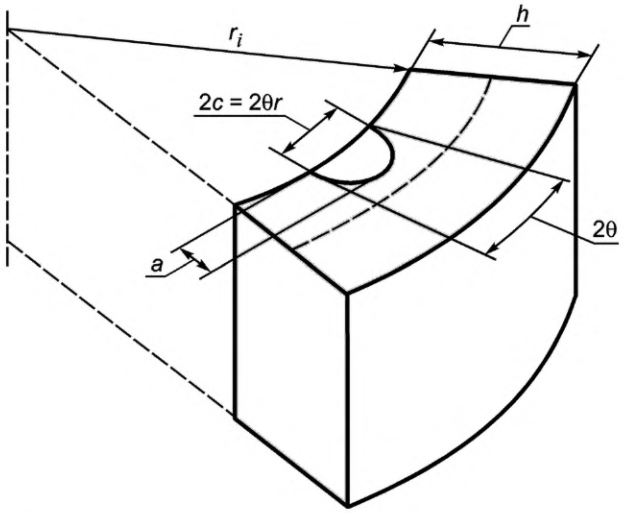
M — изгибающий момент в рассматриваемом поперечном сечении трубы, Н·мм;

$S_{тр}$ — площадь поперечного сечения трубы, мм^2;

$W_{тр}$ — момент сопротивления в рассматриваемом поперечном сечении трубы, мм^3.

Параметры S_M, S_{bg} и β находят из решения системы уравнений

$$\begin{cases} S_M = 1 - 2\cdot\frac{\beta}{\pi} - \frac{a}{h}\cdot\frac{\theta}{\pi}; \\ S_{bg} = \frac{4}{\pi}\cdot\sin\beta - \frac{2}{\pi}\cdot\frac{a}{h}\cdot\sin\theta; \\ \theta = \frac{c}{r_i}; \\ \sigma_m \cdot S_{bg} - \sigma_{bg}\cdot S_M = 0. \end{cases} \qquad (Л.6)$$



a — глубина трещины; 2*c* — длина оси полуэллиптической трещины; 2θ — угол трещины (в радианах), располагающийся симметрично плоскости действия изгибающего момента; r_i — внутренний радиус цилиндра

Рисунок Л.4 — Схема расположения трещины в диаметральной плоскости цилиндра

Параметры S'_M и S'_{bg} находят по формулам:

$$S'_M = 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin\left(\frac{a}{2h} \cdot \sin\theta\right) - \frac{a}{h} \cdot \frac{\theta}{\pi}; \quad (Л.7)$$

$$S'_{bg} = \frac{4}{\pi} \cdot \sin\left[0{,}5 \cdot \left(\pi - \frac{a}{h} \cdot \theta\right)\right] - \frac{2}{\pi} \cdot \frac{a}{h} \cdot \sin\theta. \quad (Л.8)$$

Примечание — Расчет по формуле (Л.6) допускают проводить при изменении *a/h* от 0 до 0,8 и $\theta \le (\pi - \beta)$.

Л.5 Внутренняя полуэллиптическая поверхностная трещина в цилиндре, ориентированная вдоль образующей

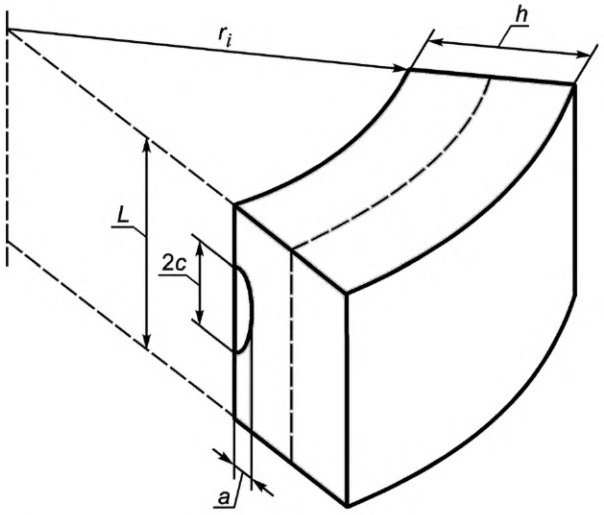
Геометрическая схема конструкции и дефекта приведена на рисунке Л.5.
Референсное напряжение определяют по формуле

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_m}{\sqrt{\left(1 - \xi^{3{,}11}\right)^{1{,}9}}}, \quad (Л.9)$$

где $\xi = \dfrac{a \cdot c}{h \cdot (c + h)}$;

σ_m — является мембранной компонентой напряжений, ориентированной перпендикулярно к плоскости трещины в цилиндре без трещины.

Примечание — Расчет по формуле (Л.9) допускают проводить при изменении *a/h* от 0 до 0,8.



a — глубина трещины; 2*c* — длина оси полуэллиптической трещины;
r_i — внутренний радиус цилиндра; *L* — высота цилиндра

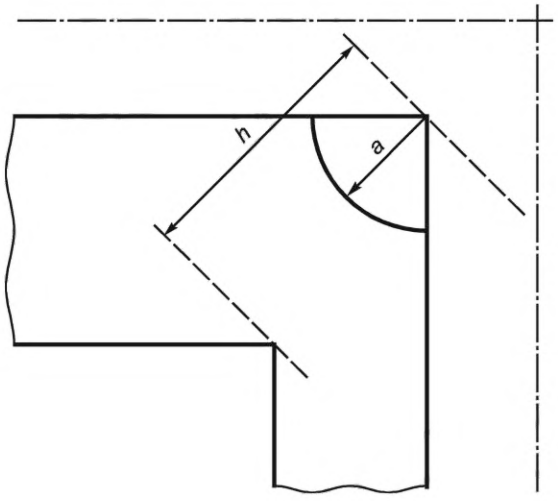
Рисунок Л.5 — Схема расположения трещины по образующей цилиндра

Л.6 Внутренняя четвертьэллиптическая поверхностная трещина в узле, образованном пересечением двух цилиндров

При рассмотрении четвертьэллиптической трещины принимают, что малая и большая полуось эллипса равны между собой.

Геометрическая схема конструкции и дефекта приведена на рисунке Л.6.

Референсное напряжение определяют по формуле (Л.9) при условии, что *h* определяют из рисунка Л.6 и *c* = *a*.



a — глубина трещины; *h* — расчетный параметр

Рисунок Л.6 — Четвертьэллиптическая поверхностная трещина в узле, образованном двумя пересекающимися цилиндрами, и схематизация расчетного параметра *h*

Приложение М
(обязательное)

Расчет коэффициентов ω и ω_b, учитывающих влияние коротких трещин и двухосного нагружения на трещиностойкость

Коэффициенты ω и ω_b, учитывающие влияние коротких трещин и двухосное нагружение на трещиностойкость, определяют следующим образом:

- при $a_p > 0{,}15 \cdot S_к$

$$\omega = 1,\ \omega_b = 1; \tag{М.1}$$

- при $a_p \le 0{,}15 \cdot S_к$

$$\omega = [m \cdot \exp(1/m) \cdot \arccos(\exp(-1/m)) \cdot \sqrt{1 - \exp(-2/m)} - 1]^{1/2}$$

$$\omega_b = \begin{cases} 1, & \text{при } m_\omega > 0{,}7 \\ 1 - 0{,}1 \cdot \beta, & \text{при } m_\omega \le 0{,}7 \end{cases}, \tag{М.2}$$

где $m = 2{,}55 \cdot a_p / (K_{JC}^{0{,}05} / R_{p0{,}2}^{T}(T))^2$; (М.3)

$m_\omega = m/\omega^2$;

a_p — глубина расчетного дефекта;

β — отношение номинальных напряжений, действующих параллельно плоскости трещины вдоль ее фронта, к номинальным напряжениям, действующим перпендикулярно плоскости трещины.

Зависимость ω_b от β используют при $0 \le \beta \le 2$. При $\beta < 0$ следует принимать $\omega_b = 1$, при $\beta > 2$ — принимать $\omega_b = 0{,}8$.

Зависимость ω от m приведена на рисунке М.1.

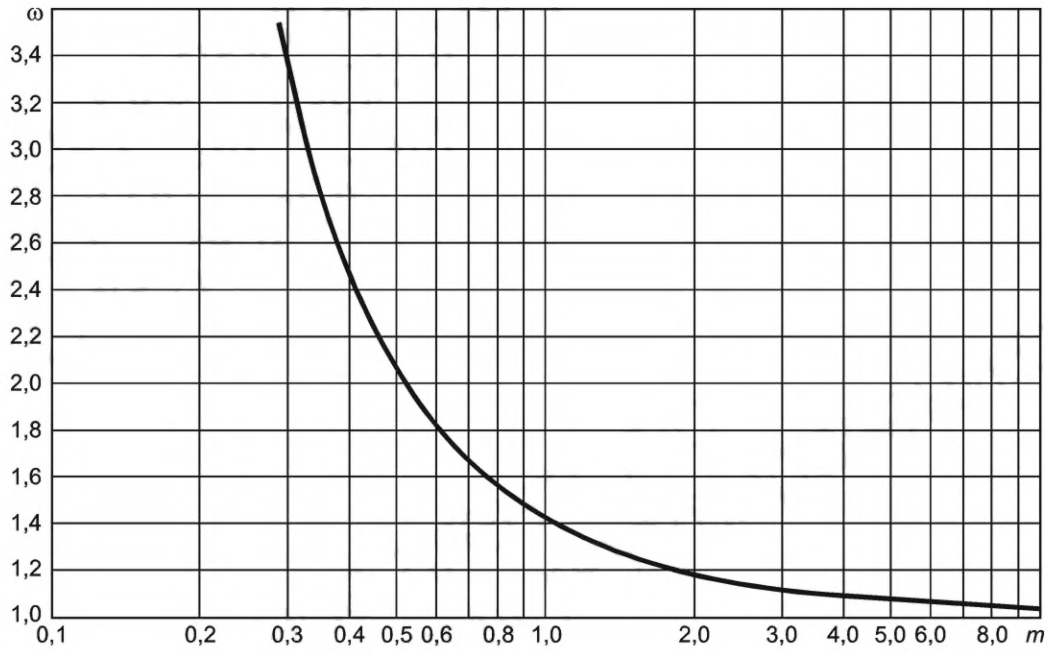


Рисунок М.1 — График зависимости ω от m

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: атомные энергетические установки, оборудование, трубопроводы, поверочный расчет, стадия проектирования

Редактор *З.Н. Киселева*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *М.В. Лебедевой*

Сдано в набор 21.10.2021. Подписано в печать 17.11.2021. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,98. Уч.-изд. л. 6,49.

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