ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59115.12— 2021

ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Уточненный поверочный расчет на постпроектных стадиях

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» имени 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. № 1175-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 2
5 Общие положения 2
6 Условия обоснования прочности компонента с учетом проведения неразрушающего эксплуатационного контроля 5
7 Расчетный дефект 7
8 Расчет на длительную статическую прочность 8
9 Расчет на длительную циклическую прочность 8
10 Расчет на прогрессирующее изменение размеров 9
11 Расчет на одностороннее накопление вязкопластических деформаций при циклическом нагружении 9
12 Расчет на сопротивление разрушению 9
Приложение А (рекомендуемое) Физико-механические свойства и диаграмма деформирования 16
Приложение Б (рекомендуемое) Статическая трещиностойкость 19
Приложение В (рекомендуемое) Скорость роста трещины при циклическом нагружении 20
Приложение Г (рекомендуемое) Скорость роста трещины при ползучести 22
Приложение Д (рекомендуемое) Скорость ползучести 24
Приложение Е (рекомендуемое) Радиационное распухание 26
Библиография 27

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 постпроектных стадиях

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

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 постпроектных стадиях, на которые распространяется действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [1].

1.2 Настоящий стандарт следует применять совместно с ГОСТ Р 59115.11 для оборудования и трубопроводов, радиационное распухание которых не превышает величины 0,02 (2 %) на конец рассматриваемого срока службы.

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

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

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

ГОСТ Р 59115.10—2021 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Уточненный поверочный расчет на стадии проектирования

ГОСТ Р 59115.11 Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Поверочный расчет на постпроектных стадиях

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 агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указа-

Издание официальное

телю «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 и определения по ГОСТ Р 59115.1, ГОСТ Р 59115.2, ГОСТ Р 59115.3, ГОСТ Р 59115.4 и ГОСТ Р 59115.10.

4 Сокращения и обозначения

В настоящем стандарте применены сокращения и обозначения по ГОСТ Р 59115.10, а также следующие условные обозначения:

F — повреждающая доза нейтронного обучения, сна;

$\frac{dF}{dt}$ — эффективная скорость набора повреждающей дозы нейтронного облучения, вычисленная с учетом КИУМ, сна/ч;

$T_{обл}$ — температура облучения, °С;

T_{He} — температура, выше которой начинает проявляться высокотемпературное гелиевое охрупчивание, °С;

S_0 — свободное радиационное распухание, отн. ед.;

S — радиационное распухание с учетом влияния напряжения, отн. ед.;

$\dot{S}_0$ — скорость свободного радиационного распухания, $ч^{-1}$;

$\dot{S}$ — скорость радиационного распухания с учетом влияния напряжения, $ч^{-1}$.

5 Общие положения

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

Уточненные поверочные расчеты проводятся с учетом значений размеров компонентов, полученных в результате измерений при эксплуатационном контроле, а также размеров выявленных несплошностей металла.

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 эксплуатации согласно ГОСТ Р 59115.11.

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.

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) конструкции	5.3.3
Достижение накопленной вязкопластической деформацией предельного значения	5.3.6
Достижение предельных остаточных изменений размеров	5.3.5

Условия обоснования прочности компонента формулируются согласно разделу 6.

5.4 Анализ реализации критических событий, должен проводиться на основании следующих 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 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 поверочных расчетов, используемых для обоснования прочности компонента

Подпункт критического события	Подпункт поверочного расчета
5.3.2	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 Значения физико-механических характеристик свойств основного металла и металла сварных швов, используемых в расчетах на прочность, должны приниматься по измеренным значениям характеристик свойств образцов-свидетелей по [1] или образцов материаловедческих сборок и обоснованным на конец проектного срока службы.

Допускается принимать значения физико-механических характеристик в соответствии с приложениями А—Е. При отсутствии значений физико-механических характеристик свойств в приложениях допускается принимать значения, используемые в проектных расчетах.

5.6 Поверочный расчет компонента должен учитывать как фактическую последовательность нагружения на период от начала эксплуатации до текущего состояния, так и прогнозируемую последовательность режимов нагружения на период от текущего состояния до рассматриваемого периода эксплуатации.

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.

5.9 Для облучаемых компонентов оборудования и трубопроводов, изготовленных из аустенитных сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 поверочные расчеты согласно данному стандарту проводятся, если радиационное распухание не превышает величины 0,02 (2 %) на конец рассматриваемого срока службы.

Условия нейтронного облучения компонента по температуре $T_{обл}$ и повреждающей дозе F в этом случае должен удовлетворять следующим условиям:

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

$$c \cdot F^{n_v} \cdot \exp[-r(T_{обл} - 470)^2] \le 0{,}02; \quad (5.1)$$

- для аустенитной стали марки 08Х16Н11М3

$$c_{D1} \cdot F^{n_v} \cdot \exp[-r_1 \cdot (T_{обл} - 470)^2] \le 0{,}02; \quad (5.2)$$

где $c = 1{,}63 \cdot 10^{-4}$ сна$^{-n_v}$; $n_v = 1{,}88$; $r = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-2}$;

$c_{D1} = 9{,}8 \cdot 10^{-5}$ сна$^{-n_v}$; $r_1 = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-2}$;

F — повреждающая доза на конец срока службы, сна.

Условия (5.1) и (5.2) используются, если $T_{обл} \le 470$ °С. Если $T_{обл} > 470$ °С, то значение F должно удовлетворять следующим условиям:

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

$$F \le \left(\frac{0{,}02}{c}\right)^{1/n_v}; \quad (5.3)$$

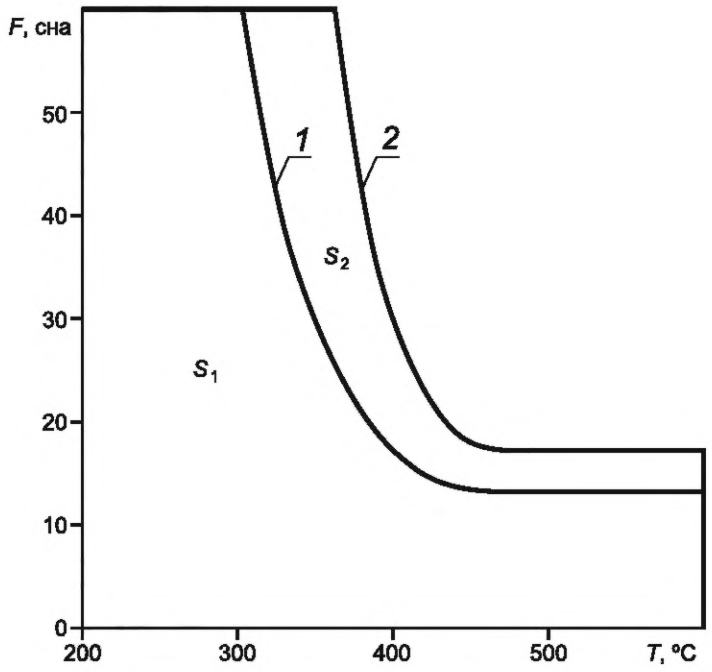
- для аустенитной стали марки 08Х16Н11М3

$$F \le \left(\frac{0{,}02}{c_{D1}}\right)^{1/n_v}. \quad (5.4)$$

Режимы облучения компонента, удовлетворяющие условиям (5.1)—(5.4) и характеризующие области использования стандарта, представлены на рисунке 5.1 в графическом виде.

Допускается не учитывать влияние нейтронного облучения на свойства аустенитных сталей, если значение $F \le 1$ сна.

5.10 Допускается проводить расчет прочности компонентов, подвергаемых нейтронному облучению, с использованием характеристик длительной прочности аустенитных сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 в исходном состоянии (без учета облучения), если $\frac{dF}{dt} \le 0{,}014$ сна $\cdot$ год$^{-1}$.



S_1 — область, ограниченная осями координат и кривой *1*; S_2 — область, ограниченная осями координат и кривой *2*

Рисунок 5.1 — Определение условий нейтронного облучения при расчете облучаемых компонентов из аустенитных сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9 (область S_1) и стали марки 08Х16Н11М3 (область S_2)

6 Условия обоснования прочности компонента с учетом проведения неразрушающего эксплуатационного контроля

6.1 Обоснование прочности компонента при НУЭ и ННУЭ должно проводиться с учетом реализованных режимов и прогнозируемой модели эксплуатации, в том числе при продлении назначенного срока службы оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

Примечание — Если прочность компонента была обоснована в соответствии с ГОСТ Р 59115.10, рассматриваемый срок эксплуатации не превышает проектного срока службы и реализованные режимы нагружения соответствуют проектной модели эксплуатации компонента, то прочность компонента считается обоснованной при НУЭ и ННУЭ.

6.2 Обоснование прочности должно проводиться для основного металла и сварных швов компонента.

Примечание — Для всех однотипных сварных швов (выполненных по одинаковой схеме разделки) допускается проводить анализ прочности только для самого нагруженного шва. Если среди анализируемых однотипных сварных швов есть как швы, которые при эксплуатации подвергаются периодическому НЭК, так и швы, которые ему не подвергаются, то анализ прочности необходимо проводить как для самого нагруженного контролируемого шва, так и для самого нагруженного неконтролируемого шва.

6.3 Условия обоснования прочности компонента зависят от проведения и результатов его периодического НЭК.

6.4 Если периодический НЭК компонента не проводят, то анализ прочности этого компонента следует проводить в соответствии с 6.4.1—6.4.4.

6.4.1 В основном металле компонента должен быть проведен анализ зарождения трещины при реализации критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6, а также ее возможного стабильного подроста.

6.4.1.1 Анализ реализации критического события 5.3.2 следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (подраздел 8.2).

6.4.1.2 Анализ реализации критического события 5.3.4 следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 9).

6.4.1.3 Анализ реализации критического события 5.3.6 следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 11).

6.4.1.4 Если прочность компонента была обоснована в соответствии с ГОСТ Р 59115.10 и реализованные режимы нагружения соответствуют проектной модели эксплуатации компонента, то допускается принимать, что критические события 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6 не реализуются до момента окончания проектного срока службы компонента.

6.4.1.5 Если прочность компонента не была обоснована в соответствии с ГОСТ Р 59115.10 или если реализованные режимы нагружения отличаются от проектной модели эксплуатации компонента, то анализ зарождения трещины должен проводиться для всего рассматриваемого периода его эксплуатации.

6.4.1.6 Если в результате анализа зарождения трещины показано, что реализуется, по крайней мере, одно из критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6, то должен быть определен момент зарождения трещины $t^{\text{зарожд}}$, соответствующий более раннему из моментов реализации критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6. В этот момент времени в основном металле компонента должен постулироваться расчетный дефект, вид и ориентация которого должны определяться согласно 7.3. Размеры постулируемого дефекта при реализации критического события 5.3.6 должны определяться согласно 7.3, а при реализации критических событий 5.3.2 и 5.3.4 — согласно 12.3.4 и согласно 12.3.2.1—12.3.2.2 соответственно.

6.4.1.7 Если по 6.4.1.6 постулирован дефект, то должен быть проведен анализ его возможного стабильного подроста в соответствии с 12.1—12.3 за время от момента времени $t^{\text{зарожд}}$ до момента окончания рассматриваемого периода эксплуатации компонента или до момента нестабильного развития дефекта (до момента реализации критического события 5.3.1).

6.4.2 В сварных швах компонента должен быть проведен анализ возможного стабильного подроста постулируемых дефектов.

6.4.2.1 На момент начала эксплуатации в самых нагруженных сварных швах каждого типа (выполненных по различным схемам разделки) должен постулироваться расчетный дефект, вид, размеры и ориентация которого должны определяться согласно 7.3.

6.4.2.2 Для каждого постулированного по 6.4.2.1 дефекта должен быть проведен анализ его возможного стабильного подроста в соответствии с 12.1—12.3 за время от начала эксплуатации до момента окончания рассматриваемого периода эксплуатации компонента или до момента нестабильного развития дефекта (до момента реализации критического события 5.3.1).

6.4.3 Если в основном металле компонента критические события 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6 не реализуются за весь рассматриваемый период эксплуатации, то в момент окончания рассматриваемого периода эксплуатации в компоненте должен постулироваться расчетный дефект с учетом рассмотрения условий согласно ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 12). Вид, размеры и ориентация расчетного дефекта должны определяться согласно 7.3.1—7.3.3.

6.4.4 Прочность компонента считается обоснованной при НУЭ и ННУЭ, если для него за весь рассматриваемый период эксплуатации не реализуются критические события 5.3.1 и 5.3.3 (выполняются условия прочности согласно 12.4 или 12.5):

- при наличии дефекта, постулируемого по 6.4.1.6, с учетом его возможного стабильного подроста;
- для каждого дефекта, постулированного по 6.4.2.1, с учетом его возможного стабильного подроста;
- при наличии дефекта, постулируемого по 6.4.3.

6.5 Если периодический НЭК компонента проводится в соответствии с [2] и при этом несплошности не выявлены, либо размер выявленной несплошности не больше допустимого размера несплошности, то анализ прочности этого компонента должен проводиться в соответствии с 6.5.1—6.5.3.

6.5.1 В компоненте должен быть проведен анализ зарождения трещины при реализации критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6, а также ее возможного стабильного подроста. Анализ проводится в соответствии с 6.4.1.1—6.4.1.7.

6.5.2 Если критические события 5.5.1, 5.5.2 и 5.5.3 не реализуются в компоненте за весь рассматриваемый период эксплуатации, то в момент окончания рассматриваемого периода эксплуатации в компоненте должен постулироваться расчетный дефект с учетом рассмотрения условий согласно ГОСТ Р 59115.9—2021 (раздел 12). Вид, размеры и ориентация расчетного дефекта должны определяться согласно 7.3.1—7.3.3.

6.5.3 Прочность компонента считается обоснованной при НУЭ и ННУЭ, если для него за весь рассматриваемый период эксплуатации не реализуются критические события 5.3.1 и 5.3.3 (выполняются условия прочности согласно 12.4 или 12.5):

- при наличии дефекта, постулируемого по 6.4.1.6, с учетом его возможного стабильного подроста;
- при наличии дефекта, постулируемого по 6.5.2.

6.6 Если периодический НЭК компонента проводится и при этом в некоторый момент времени t_{det} (отсчет времени ведется от начала эксплуатации компонента) выявлена несплошность, размер которой больше допустимого размера несплошности, то анализ прочности этого компонента проводится в соответствии с 6.6.1—6.6.6.

6.6.1 Определятся расчетный момент зарождения выявленного дефекта. Для этого проводится анализ зарождения трещины при реализации критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6, а также ее стабильного подроста.

6.6.1.1 Анализ реализации критического события 5.3.2 должен проводиться в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (подраздел 8.2).

6.6.1.2 Анализ реализации критического события 5.3.4 должен проводиться в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 9).

6.6.1.3 Анализ реализации критического события 5.3.6 должен проводиться в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 11).

6.6.1.4 Анализ реализации критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6 должен проводиться для периода времени от начала эксплуатации компонента до момента времени t_{det}.

6.6.1.5 Если в результате анализа зарождения трещины показано, что, по крайней мере, одно из критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6 реализуется, то должен быть определен момент времени $t^{зарожд}$, соответствующий более раннему из моментов реализации критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6. В момент времени $t^{зарожд}$ в рассматриваемой области должен постулироваться расчетный дефект, вид и ориентация которого должны определяться согласно 7.3. Размеры постулируемого дефекта при реализации критического события 5.3.6 должны определяться согласно 7.3, а при реализации критических событий 5.3.2 и 5.3.4 — согласно 12.3.4 и согласно 12.3.2.1—12.3.2.2 соответственно.

6.6.1.6 Для постулированного по 6.6.1.5 дефекта должен быть проведен анализ его стабильного подроста в соответствии с 12.1—12.3 за время от $t^{зарожд}$ до t_{det}.

6.6.2 Если на момент времени t_{det} размер постулированного дефекта с учетом его стабильного подроста превышает размер выявленной несплошности, то должен быть выполнен анализ его дальнейшего подроста в соответствии с 12.1—12.3 за время до конца рассматриваемого периода эксплуатации.

6.6.3 Прочность компонента с этим дефектом считается обоснованной при НУЭ и ННУЭ, если в нем не реализуются критические события 5.3.1 и 5.3.3 (выполняются условия прочности согласно 12.4 или 12.5), в том числе с учетом возможного стабильного подроста дефекта. В этом случае анализ по 6.6.4—6.6.6 не проводится.

6.6.4 Если на момент времени t_{det} размер постулированного дефекта с учетом его стабильного подроста не превышает размера выявленной несплошности, либо если в результате анализа зарождения трещины показано, что ни одно из критических событий 5.3.2, 5.3.4 и 5.3.6 не реализуется, то на момент начала эксплуатации в рассматриваемой области должен постулироваться расчетный дефект, вид, размеры и ориентация которого должны определяться согласно 7.3.1—7.3.3. Для постулированного дефекта должен быть проведен анализ его стабильного подроста в соответствии с 12.1—12.3 за время от начала эксплуатации элемента (компонента) до t_{det}.

6.6.5 Если на момент времени t_{det} размер постулированного по 6.6.4 дефекта (с учетом его стабильного подроста) превышает размер выявленной несплошности, то должен быть выполнен анализ его дальнейшего подроста в соответствии с 12.1—12.3 за время до конца рассматриваемого периода эксплуатации. Прочность компонента с этим дефектом считается обоснованной при НУЭ и ННУЭ, если в нем не реализуются критические события 5.3.1 и 5.3.3 (выполняются условия прочности согласно 12.4 или 12.5), в том числе с учетом возможного стабильного подроста дефекта. В этом случае анализ по 6.6.6 не проводится.

6.6.6 Если на момент времени t_{det} размер постулированного дефекта с учетом его стабильного подроста не превышает размера выявленной несплошности, то дальнейшее использование зависимостей для описания подроста дефектов должно быть обосновано. Решение о допуске использования этих зависимостей должно приниматься эксплуатирующей организацией и подлежит рассмотрению уполномоченным органом государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии вместе с заключением организации научно-технической поддержки органа государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии.

6.7 Дополнительно для обоснования прочности компонента в течение всего рассматриваемого периода эксплуатации должно выполняться условие не реализации критического события 5.3.5 (выполняется условие недостижения предельных изменений размеров согласно разделу 10).

7 Расчетный дефект

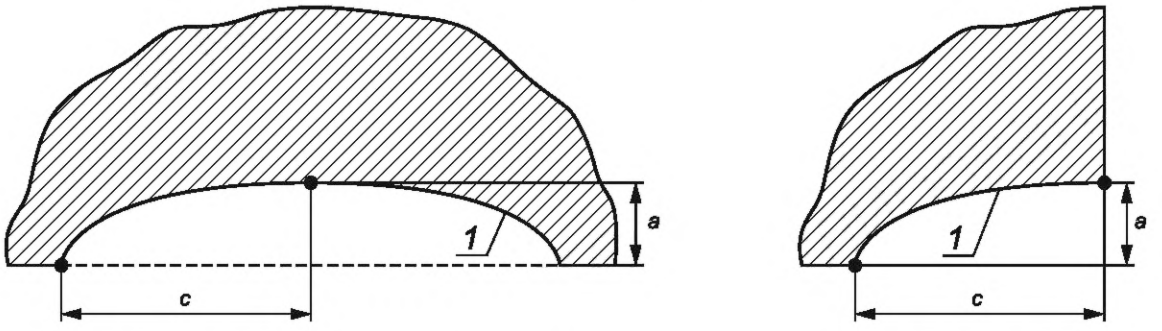
7.1 В зависимости от условий постулирования расчетного дефекта и геометрии компонента допускаются следующие виды расчетного дефекта:

- поверхностная полуэллиптическая трещина [рисунок 7.1а)];
- поверхностная четвертьэллиптическая трещина [рисунок 7.1б)].

Расчетный дефект характеризуется размерами большой полуоси c и малой полуоси a.

а) Поверхностная полуэллиптическая трещина

б) Поверхностная угловая четвертьэллиптическая трещина



а) Поверхностная полуэллиптическая трещина

б) Поверхностная угловая четвертьэллиптическая трещина

1 — фронт трещины

Рисунок 7.1 — Виды расчетного дефекта в компоненте

7.2 При обосновании прочности согласно 6.4.1 расчетный дефект в сварном шве должен постулироваться в виде поверхностной трещины.

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

7.2.2 Отношение c_0/a_0 начальных размеров большой полуоси c_0 к малой полуоси a_0 расчетного дефекта должно приниматься равным 3. Начальный размер малой полуоси a_0 расчетного дефекта в направлении толщины свариваемых компонентов должен определяться по формуле

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

где l_0 — максимальная глубина дефекта технологического происхождения (в сварном шве).

Значение l_0 определяется 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

7.2.3 Расчетный дефект должен быть ориентирован таким образом, чтобы его рост был максимальный за рассматриваемый период эксплуатации.

Примечание — Сопротивление нестабильному развитию трещины определяется отношением $J_c/J(K_{JC}/K_I)$ согласно 12.

7.2.4 Конечные размеры расчетного дефекта с учетом его возможного стабильного роста должны определяться в соответствии с разделом 12.

7.3 При реализации критического события 5.3.2, 5.3.4 или 5.3.6 расчетный дефект должен постулироваться в основном металле или сварном шве в виде поверхностной трещины.

7.3.1 Вид расчетного дефекта (полуэллиптическая или четвертьэллиптическая трещина) должен определяться геометрией компонента, в котором постулируется этот дефект.

7.3.2 Отношение c_0/a_0 начальных размеров большой полуоси c_0 к малой полуоси a_0 расчетного дефекта должно приниматься равным 3. Начальный размер малой полуоси a_0 расчетного дефекта должен приниматься в зависимости от толщины H_t компонента или свариваемых компонентов равным:

- 1 мм при H_t менее 4 мм;
- 0,25 H_t при H_t от 4 до 8 мм;
- 2 мм при H_t более 8 мм.

7.3.3 Расчетный дефект должен быть ориентирован таким образом, чтобы его сопротивление нестабильному развитию было минимальным.

Примечание — Сопротивление нестабильному развитию трещины определяется отношением $J_c/J(K_{JC}/K_I)$ согласно 12.

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

8 Расчет на длительную статическую прочность

Расчет на длительную статическую прочность следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (подраздел 8.2).

Для облучаемых материалов расчет на длительную статическую прочность следует проводить с использованием формул, приведенных в приложении Д.

9 Расчет на длительную циклическую прочность

Расчет на длительную циклическую прочность следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 9).

Расчет кривых усталости следует проводить по ГОСТ Р 59115.10—2021 (приложение И). Для облучаемых материалов расчет кривых усталости следует проводить с использованием значений характеристик свойств материалов, приведенных в приложении А.

10 Расчет на прогрессирующее изменение размеров

Расчет на прогрессирующее изменение размеров следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 10).

Для облучаемых материалов расчет на прогрессирующее изменение размеров следует проводить с использованием уравнений ползучести и радиационного распухания, приведенных в приложениях Д и Е соответственно.

11 Расчет на одностороннее накопление вязкопластических деформаций при термоциклическом нагружении

Расчет на одностороннее накопление вязкопластических деформаций при циклическом нагружении следует проводить в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (раздел 11).

Для облучаемых материалов расчет на одностороннее накопление вязкопластических деформаций при термоциклическом нагружении следует проводить с использованием уравнений ползучести и радиационного распухания, приведенных в приложениях Д и Е соответственно.

12 Расчет на сопротивление разрушению

12.1 Общие положения

12.1.1 Расчет на сопротивление разрушению должен проводиться 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 проводится во всем диапазоне температур эксплуатации компонента.

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

Для компонентов, в которых максимальная температура T равна или ниже T_t расчеты следует проводить согласно 12.3 и 12.4.

12.1.3 Расчет на сопротивление разрушению следует проводить для фактической последовательности режимов эксплуатации с учетом всех факторов нагружения, физико-механических характеристик свойств основного металла и сварных швов в процессе эксплуатации.

12.1.4 Расчетный дефект должен быть ориентирован таким образом, чтобы его сопротивление нестабильному развитию, определяемое отношением J_c/J(или K_{JC}/K_I), было минимальным.

12.1.5 Для анализа развития трещины 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 рассматриваемом периоде эксплуатации.

Примечания

1 Для повышения точности и уменьшении 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 параметрами облучения (повреждающей дозой F и скоростью набора дозы $\frac{dF}{dt}$) и 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 ГОСТ Р 59115.10—2021 (подраздел Е.4 приложения Е) и уравнений пластического деформирования идеального упругопластического тела согласно ГОСТ Р 59115.10—2021 (подразделы Е.2 и Е.3.2 приложения Е).

Для облучаемых материалов для определения НДС следует использовать уравнения ползучести, приведенные в приложении Д.

12.1.7 Анализ развития трещины при циклическом нагружении по механизму усталости следует выполнять на основе упругого расчета с использованием параметров линейной механики разрушения (коэффициентов интенсивности напряжений). Уравнения, используемые для проведения упругого расчета, приведены в ГОСТ Р 59115.10—2021 (подраздел Е.2 приложения Е).

Примечание — При упругом расчете следует вводить начальные деформации равные неупругим деформациям, полученным из упруго-вязкопластического расчета. Допускается 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 ГОСТ Р 59115.10—2021 (приложение Л).

12.2.2 Для фактической 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 исключаются временные интервалы, при которых температура T зоны с трещиной ниже T_t.

Примечание — Для повышения точности и уменьшении 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 с трещины (см. рисунок 7.1) при нормальных к трещине напряжений σ_n, используемых при расчете σ_{ref}.

12.2.4 Начальные значения размеров трещины определяются с использованием положений раздела 6.

При реализации критического события 5.3.2 глубина начальной поверхностной трещины [размер a_0, рисунок 7.1а)] принимается:

- равной размеру зоны повреждения в месте зарождения, внешняя граница которой ограничена значением повреждения равным 0,5, если этот размер больше глубины начальной поверхностной трещины [размер a_0, рисунок 7.1а)] согласно 7.3.2;
- равной размеру глубины начальной поверхностной трещины [размер a_0, рисунок 7.1а)] согласно 7.3.2, если размер зоны повреждения не превышает размера глубины этой трещины.

Начальные размеры дефекта при реализации критического события 5.3.6 принимаются согласно 7.3.

Размер c_0 принимается согласно 7.3.2, ориентация расчетного дефекта — согласно 7.3.3.

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

Примечания

1 Расчет КИН рекомендуется проводить методом МВФ с использованием распределения нормальных напряжений σ_n к плоскости трещины, рассчитанных при ее отсутствии.

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 $\sigma_{осн} = \left[\left(\sigma_{0,2}^0\right)^{1-n_c} - E^T \cdot \frac{a_c}{\left(\sigma_0\right)^{n_c}} \cdot t_j \cdot \left(1-n_c\right)\right]^{\frac{1}{1-n_c}}$;

$\sigma_{0,2}$ — 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 ГОСТ Р 59115.10—2021 (подраздел Е.6 приложения Е). Для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 и 07Х12НМФБ значения a_c и n_c приведены в таблице Д.1 (приложение Д).

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

$$\Delta a_j = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot A_r (C_a^*)^{n_r} \cdot \Delta t_j, \quad (12.2)$$

$$\Delta c_j = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot A_r (C_c^*)^{n_r} \cdot \Delta t_j, \quad (12.3)$$

где A_r, n_r — константы;

ω_1, ω_2 — коэффициенты, увеличивающие скорость роста трещины при ползучести за счет облучения;

C_a^*, C_c^* — C^*-интеграл в точках a и c трещины, вычисляемый с использованием зависимостей приложения Г, по формулам:

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

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

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} проводится в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (приложение 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 отчетах по материалам, или по техническим решениям, согласованным с ГМО.

Значения ω_1 и ω_2 для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9 и 08Х16Н11М3 приведены в приложении Г.

При расчете ω_2 повреждающая доза должна соответствовать моменту времени конца интервала Δt_j.

Расчет ξ_{ref}^j проводится по формулам приложения Г с использованием формул приложения Д.

12.2.7 Текущие размеры трещины следует определять по формулам:

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

$$c_j = c_{j-1} + \Delta c_j. \tag{12.7}$$

12.2.8 Конечные размеры a_τ и c_τ трещины при длительном нагружении при ползучести следует определять последовательным повторением расчета по 12.2.5—12.2.7 до достижения конца последовательности режимов нагружения.

12.3 Расчет развития трещины при циклическом нагружении по механизму усталости

12.3.1 Для анализа развития трещины при циклическом нагружении по механизму усталости следует определить размахи КИН на основании упругого расчета. При этом, если расчет выполняется для компонента, в котором максимальная температура T превышает T_t, то упругий расчет проводится с использованием начальных деформаций, полученных на этапе упруго-вязкопластического расчета.

Примечание — Допускается 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 равным 0,95.

12.3.2 Начальные значения размеров трещины принимаются равными a_τ и c_τ, полученным согласно 12.2, если проводился расчет с учетом развития трещины при температуре T превышающей T_t.

В случае если расчет проводится для компонента, в которых максимальная температура T не превышает T_t, то при реализации критического события 5.3.4 начальные значения размеров трещины принимается согласно 12.3.2.1 и 12.3.2.2.

12.3.2.1 При реализации критического события 5.3.4 глубина начальной поверхностной трещины [размер a_0, рисунок 7.1а)] принимается согласно 7.3.2, если размах напряжений, равный $\Delta\varepsilon \cdot E^T$ ($\Delta\varepsilon$ — размах деформации при циклическом деформировании) в месте зарождения трещины не превышает двух пределов текучести.

12.3.2.2 Если размах напряжений в месте зарождения трещины превышает два предела текучести, то размер глубины начальной трещины принимается:

- равной наибольшему размеру зоны циклического упругопластического деформирования в месте зарождения, если этот размер больше глубины начальной поверхностной трещины [размер a_0, рисунок 7.1а)] согласно 7.3.2. Граница зоны упругопластического деформирования определяется из условия не превышения размаха напряжений двух пределов текучести;

- равной размеру глубины начальной поверхностной трещины [размер a_0, рисунок 7.1а)] согласно 7.3.2, если размер зоны пластического деформирования не превышает размера глубины этой трещины.

Размер c_0 принимается согласно 7.3.2, ориентация расчетного дефекта — согласно 7.3.3.

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

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

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

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

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

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

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

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

ΔK_{th} — пороговый размах КИН I-го рода;

ω^{Sw}, $\omega^{\text{стар}}$ — коэффициенты ускорения роста трещины вследствие радиационного распухания и температурного старения соответственно.

Расчет $\Delta K^k_{(a)}$, $\Delta K^k_{(c)}$, R_a, R_c выполняется согласно В.1 (приложение В).

Расчет C_f проводится для максимальной температуры k-го цикла нагружения и повреждающей дозе, соответствующей моменту времени конца k-го цикла нагружения.

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

12.3.5 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.

12.3.6 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 12.3.4 и 12.3.5 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 проводится по ГОСТ Р 59115.14.

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

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

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

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;

n — коэффициент запаса;

K_{JC} — трещиностойкость, определяемая по формуле

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

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 $T > T_i$) или расчета в упругопластической постановке (при $T \le T_i$).

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 $\sigma_{осн} = \left[\left(\sigma_{0,2}^0\right)^{1-n_c} - E^T \cdot \frac{a_c}{(\sigma_0)^{n_c}} \cdot t_j \cdot (1-n_c)\right]^{\frac{1}{1-n_c}}$;

$\sigma_{0,2}$ — 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 принимаются согласно приложениям А и Б.

Значение K_{JC} для материалов ферритного класса принимаются 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:

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

$$a \le 0{,}5S_к. \tag{12.16}$$

Расчет σ_{ref} проводится в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (приложение 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 сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3) и ГОСТ Р 59115.3.

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

- для постулируемого по 6.4.1.6, 6.4.2.1, 6.6.1.5, 6.6.4 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 6.4.3 и 6.5.2 дефекта — значения a_0 и c_0, принятые по 7.3.

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

12.5.1 Условие прочности считается выполненным, если для каждого рассматриваемого момента времени τ протекания расчетного режима выполняется 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.

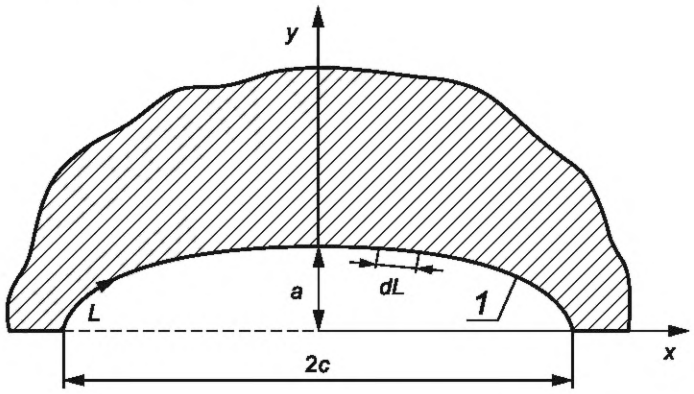


Рисунок 12.1 — Схематизация расчетной поверхностной полуэллиптической трещины

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

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

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).

12.5.3 Для режимов с неизотермическими немонотонными условиями нагружения расчет проводится 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) рассчитывается по формуле

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

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

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

$K_{\max}(L,\tau) = \max\limits_{(0,\tau)} \left[K_J(L,\tau) \right]$ — 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} — минимально возможная статическая трещиностойкость, K_{min} = = 20 МПа · $\sqrt{м}$;

$\dot{K}_j(L, \tau)$ — 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 $n_i \cdot K_J < K_{min}$, принимается $n_i \cdot K_J = K_{min}$.

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

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

$$n_i \cdot K_J \le K_C, \tag{12.21}$$

исключая те моменты времени, когда выполняется 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 рассчитывается по формуле

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

где

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

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

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

B_0 = 25 мм;

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

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

K_{min} = 20 МПа · $\sqrt{м}$.

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

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

Значения ω и ω_b определяются по ГОСТ Р 59115.10—2021 (приложение М).

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

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

$$a \le 0{,}5 S_к. \tag{12.26}$$

Расчет σ_{ref} проводится в соответствии с приложением Л с учетом размеров (a и c) трещины 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 6.4.1.6, 6.4.2.1, 6.6.1.5, 6.6.4 дефекта — значения a_N и c_N, определенные по 12.3;
- для постулируемого по 6.4.3 и 6.5.2 дефекта — значения a_0 и c_0, принятые по 7.3.

Приложение А
(рекомендуемое)

Физико-механические свойства и диаграмма деформирования

А.1 Зависимость предела текучести от температуры, повреждающей дозы нейтронного облучения и температуры облучения

А.1.1 Зависимость средних значений предела текучести от температуры для исходного (необлученного, $F = 0$) состояния основного металла и сварного шва в области температур эксплуатации описывается формулой

$$\bar{R}^0_{p0,2}(T) = \sigma_{YG} + \sigma_{YS}, \text{ МПа при } 20\ °C \le T \le 650\ °C, \quad (А.1)$$

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 средних значений предела текучести от повреждающей дозы нейтронного облучения, температуры расчетного режима и температуры облучения в отсутствие распухания описывается формулой

$$\bar{R}_{p0,2}(F, T, T_{обл}) = \bar{R}^0_{p0,2}(T) + \Delta R_{p0,2}(F, T_{обл}), \text{ МПа при } T \le T_{обл}, \quad (А.2)$$

где $\Delta R_{p0,2}(F, T_{обл})$ — зависимость приращения предела текучести основного металла и металла сварного шва от повреждающей дозы нейтронного облучения и температуры облучения:

$$\Delta R_{p0,2}(F, T_{обл}) = A_{\sigma_{0,2}}(T_{обл}) \cdot \sqrt{1 - \exp(-0{,}094 \cdot F)}, \text{ МПа}, \quad (А.3)$$

$$A_{\sigma_{0,2}}(T_{обл}) = \begin{cases} 0{,}7 \cdot T_{обл} + 365 \text{ при } 20\ °C \le T_{обл} \le 300\ °C \\ 575 \text{ при } 300\ °C < T_{обл} \le 450\ °C \\ 1502 - 2{,}06 \cdot T_{обл} \text{ при } 450\ °C < T_{обл} \le 650\ °C \end{cases}. \quad (А.4)$$

А.1.3 Зависимость минимальных значений предела текучести от повреждающей дозы нейтронного облучения, температуры расчетного режима и температуры облучения в отсутствие распухания описывается формулой

$$R^T_{p0,2}(F, T, T_{обл}) = R^0_{p0,2}(T) + \Delta R_{p0,2}(F, T_{обл}), \text{ МПа при } T \le T_{обл}, \quad (А.5)$$

где $R^0_{p0,2}$ — минимальное значение предела текучести для исходного состояния материала, принимаемое согласно ГОСТ Р 59115.3.

Примечание — Формулы (А.2)—(А.5) справедливы при $T \le T_{обл}$.

А.2 Зависимость предела прочности от температуры, повреждающей дозы нейтронного облучения и температуры облучения

А.2.1 Зависимость средних значений предела прочности от температуры для материала в исходном состоянии описывается формулами:

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

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

- для стали марки 08Х16Н11М3

$$\overline{R}^0_m(T) = \begin{cases} 463 + 153 \cdot \exp\left(-9{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot T\right), \text{МПа при } 20\ ^\circ\text{C} \le T < 550\ ^\circ\text{C} \\ 1081 - 1{,}122 \cdot T, \text{МПа при } 550\ ^\circ\text{C} \le T \le 650\ ^\circ\text{C} \end{cases}. \quad (A.7)$$

А.2.2 Зависимость средних значений предела прочности от повреждающей дозы нейтронного облучения, температуры испытаний и температуры облучения в отсутствие распухания описывается формулой

$$\overline{R}_m(F, T, T_{обл}) = \overline{R}^0_m(T) + \Delta R_m(F, T_{обл}) \text{ при } T \le T_{обл}, \text{ МПа}, \quad (A.8)$$

где $\overline{R}^0_m(T)$ — температурная зависимость предела прочности основного металла и металла сварного шва в исходном (необлученном) состоянии, МПа;

$\Delta R_m(F, T_{обл})$ — зависимость приращения предела прочности от повреждающей дозы нейтронного облучения и температуры облучения, МПа;

$$\Delta R_m(F, T_{обл}) = \begin{cases} 414 \cdot \sqrt{1 - \exp(-0{,}06 \cdot F)}, \text{МПа при } 350\ ^\circ\text{C} < T_{обл} \le 450\ ^\circ\text{C} \\ (1208 - 1{,}765 \cdot T_{обл}) \cdot \sqrt{1 - \exp(-0{,}06 \cdot F)}, \text{МПа при } 450\ ^\circ\text{C} < T_{обл} \le 650\ ^\circ\text{C} \end{cases}. \quad (A.9)$$

А.3 Зависимость модуля упругости от температуры

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

$$E^T = 206000 - 83 \cdot T, \text{ МПа}. \quad (A.10)$$

А.4 Зависимость критической деформации разрушения от температуры, повреждающей дозы нейтронного облучения и температуры облучения

А.4.1 При $T < T_{He}$ критическую деформацию разрушения определяют по формуле

$$\varepsilon_f^{tr} = \varepsilon_f^0 \cdot (1 - f(F)) \cdot \Psi(P_{Holl}), \quad (A.11)$$

где

$$\psi(P_{Holl}) = \begin{cases} -A_{aging} \cdot P_{Holl} + B_{aging} \text{ при } P_{Holl} \ge P_{th} \\ 1 \text{ при } P_{Holl} < P_{th} \end{cases}; \quad (A.12)$$

$$f(F) = A_\varepsilon \cdot (1 - \exp(-B_\varepsilon \cdot F))^{0,5}; \quad (A.13)$$

$P_{th} = 6415$; $A_\varepsilon = 0{,}53$; $B_\varepsilon = 0{,}117$ сна$^{-1}$; $T_{He} = 400$ °С;

ε_f^0 — критическая деформация разрушения при одноосном растяжении для необлученного (исходного состояния) материала, $\varepsilon_f^0 = 0{,}69$;

ε_f^{tr} — критическая деформация при транскристаллитном разрушении.

Параметр P_{Holl} вычисляют по формуле

$$P_{Holl} = (T + 273) \cdot (c + \lg(t)), \quad (A.14)$$

где T — температура, °С;

$c = 5{,}15$.

Значения коэффициентов A_{aging} и B_{aging} в формуле (А.12) следует принимать равными:

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

А.4.2 При $T \ge T_{He}$ критическую деформацию разрушения определяют по формуле

$$\varepsilon_f = \min(\varepsilon_f^{tr}, \varepsilon_f^{int}), \quad (A.15)$$

где ε_f^{int} — критическая деформация при интеркристаллитном разрушении

$$\varepsilon_f^{int} = \varepsilon_f^0 \cdot (1 - f(F)) \cdot \Omega(T - T_{He}); \quad (A.16)$$

$\Omega(T - T_{He})$ — параметр, характеризующий снижение пластичности и трещиностойкости при $T > T_{He}$ за счет реализации механизма высокотемпературного радиационного охрупчивания

$$\Omega(T - T_{He}) = 1 - \gamma(T_{He}) \cdot (T - T_{He}); \quad (A.17)$$

$\gamma(T_{He})$ — коэффициент, характеризующий темп снижения пластичности и трещиностойкости

$$\gamma(T_{He}) = 2{,}25 \cdot 10^{-5} \cdot T_{He} - 5{,}34 \cdot 10^{-3}. \quad (A.18)$$

Формула (А.18) используют, если концентрация гелия, образующегося в результате ядерных реакций $C_{He} \ge 1 \cdot 10^{-5}$ ат. %. При $C_{He} < 1 \cdot 10^{-5}$ ат. % принимается $\Omega = 1$.

А.5 Диаграмма деформирования

Диаграмма деформирования описывается формулой

$$\sigma_{eq}(F, T, T_{обл}) = [\sigma_{0,2}(F, T, T_{обл}) + A(F, T, T_{обл}) \cdot æ_p^{n_p(F, T, T_{обл})}] \text{ при } \sigma_{eq} \ge \sigma_{0,2}, \quad (A.19)$$

где $æ_p = \int d\varepsilon_{eq}^{p}$;

$$A(F, T, T_{обл}) = b_1 - b_2 \cdot T - b_3 \cdot \Delta\sigma_{0,2}(F, T_{обл}) \text{ при } T \geq 200 \text{ °C;} \quad (A.20)$$

b_1 = 1408 МПа; b_2 = 1,4 Мпа °С$^{-1}$; b_3 = 1,6 — для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9

b_1 = 1482 МПа; b_2 = 1,4 МПа °С$^{-1}$; b_3 = 1,6 — для стали марки 08Х16Н11М3;

$$n_p(F, T, T_{обл}) = 0,5 \cdot \left(\frac{A}{A_0}\right)^{0,5},$$

A_0 = 1000 МПа.

Если в результате расчета по формуле (А.20) получают $A < 0$, то принимают $A = 0$.

Примечание — При проведении расчетов для стационарных режимов необходимо учитывать, что текущая температура эксплуатации T совпадает с температурой облучения $T_{обл}$. В переходных режимах $T_{обл}$ отличается от текущей температуры эксплуатации T. В этом случае принимают, что $T_{обл}$ соответствует температуре предшествующего стационарного режима.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Статическая трещиностойкость

Б.1 Статическая трещиностойкость в терминах критического значения *J*-интеграла при $T < T_{He}$ определяется по формуле

$$J_C^{trans} = C_J \cdot \sigma_{flow}\left(F,T,T_{обл}\right)\cdot\left[0,1+0,9\cdot\exp\left(-0,3\cdot F\right)\right]\cdot\phi_J(S)\cdot\psi(P_{Holl})\cdot\left[1-\left(\frac{S}{1+S}\right)^{2/3}\right],\ \text{Н/мм}, \quad (Б.1)$$

где
$$\varphi_J(S) = (1 - 19,03 \cdot S) \cdot \exp(-6,94 \cdot S^{0,865}); \quad (Б.2)$$

$$\sigma_{flow} = \frac{\overline{R}_{p0,2}\left(F,T,T_{обл}\right)+\overline{R}_m\left(F,T,T_{обл}\right)}{2}; \quad (Б.3)$$

T_{He} = 400 °С.

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

Расчет $\overline{R}_{p0,02}(F, T, T_{обл})$ и $\overline{R}_m(F, T, T_{обл})$ выполняют согласно А.1 (приложение А).

Расчет $\Psi(P_{Holl})$ для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9 и 08Х16Н11М3 выполняют по формуле (А.11) (приложение А).

Расчет $\Psi(P_{Holl})$ 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):

$$\psi\left(P_{Holl}\right) = \begin{cases} -A_{aging}\cdot P_{Holl} + B_{aging} \text{ при } P_{th} < P_{Holl} \le 8350 \\ a_1\cdot\exp\left(\dfrac{a_2}{P_{Holl}-a_3}\right)+a_4 \text{ при } P_{Holl} > 8350 \\ 1 \text{ при } P_{Holl} \le P_{th} \end{cases}, \quad (Б.4)$$

где A_{aging} = 8,75 · 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):

$$\psi_{w2}\left(P_{Holl}\right) = \begin{cases} -A_{aging}\cdot P_{Holl} + B_{aging} \text{ при } P_{th} < P_{Holl} \le 8200 \\ a_1\cdot\exp\left(\dfrac{a_2}{P_{Holl}-a_3}\right)+a_4 \text{ при } P_{Holl} > 8200 \\ 1 \text{ при } P_{Holl} \le P_{th} \end{cases}, \quad (Б.5)$$

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

Расчет радиационного распухания *S* выполняется согласно приложению Е.

Б.2 Статическую трещиностойкость при $T \ge T_{He}$ определяют по формуле

$$J_C = \min(J_C^{trans}, J_C^{int}), \quad (Б.6)$$

где
$$J_C^{int} = C_J \cdot \sigma_{floe}(F, T) \cdot [0,1 + 0,9 \cdot \exp(-0,3 \cdot F)] \cdot \Omega(T - T_{He}); \quad (Б.7)$$

$\Omega(T - T_{He})$ рассчитывают по формуле (А.16) (приложение А).

Приложение В
(рекомендуемое)

Скорость роста трещины при циклическом нагружении

В.1 Скорость роста трещины при циклическом нагружении в исходном состоянии при температурах от 20 °С до 650 °С определяют по формуле

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

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

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

$n_f = 3,3$;

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

Значение C_f для основного металла и металла сварного шва сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3, облученных до повреждающих доз 45 сна, определяют по формулам:

- для основного металла

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

- для металла сварных швов при повреждающей дозе F не более 4 сна

$$C_f = \begin{cases} 5,20 \cdot 10^{-9} \text{ при } T \le 350\ ^\circ\text{C} \\ 5,20 \cdot 10^{-9} \cdot \exp\left(0,342 \cdot (T-350)^{0,356}\right) \text{ при } T > 350\ ^\circ\text{C} \end{cases}; \quad (В.4)$$

- для металла сварных швов при повреждающей дозе F свыше 4 сна

$$C_f = \begin{cases} 1,56 \cdot 10^{-8} \text{ при } T \le 350\ ^\circ\text{C} \\ 1,56 \cdot 10^{-8} \cdot \exp\left(0,342 \cdot (T-350)^{0,356}\right) \text{ при } T > 350\ ^\circ\text{C} \end{cases}. \quad (В.5)$$

В.2 Скорость роста трещины при циклическом нагружении с учетом термического старения и радиационного распухания определяют по формуле

$$\left(\frac{dl}{dN}\right) = \omega^{Sw}(S) \cdot \omega^{\text{стар}}(P_{Holl}) \cdot \left(\frac{dl}{dN}\right)_{\text{исх}}, \quad (В.6)$$

где

$$\omega^{SW}(S) = [(1 - A_v(S)) \cdot \varphi(S)]^{-1,65}; \quad (В.7)$$

$$\omega^{\text{стар}}(P_{Holl}) = [\Psi(P_{Holl})^{-1,65}; \quad (В.8)$$

$$A_v(S) = \left(\frac{S}{1+S}\right)^{2/3}; \quad (В.9)$$

$\varphi(S)$ — снижение критической деформации разрушения от распухания

$$\varphi(S) = \exp(-A_{SW} \cdot S_{sw}^n); \quad (В.10)$$

$A_{sw} = 6,55$; $n_{sw} = 0,67$.

$\Psi(P_{Holl})$ рассчитывается по формуле (А.11) (приложение А).

В.3 Значения ΔK_{th} рассчитывают по формуле

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

где

- для основного металла

$$\Delta K_{th}^{0} = \begin{cases} 6{,}14 \cdot \left(1 - \left(\dfrac{G_z}{10{,}8}\right)^{3{,}9}\right) \text{ при } 20\,^{\circ}\text{C} \le T < 550\,^{\circ}\text{C} \\ 2{,}50 \text{ при } 550\,^{\circ}\text{C} \le T \le 600\,^{\circ}\text{C} \end{cases}, \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}; \quad \text{(B.12)}$$

- для металла сварных швов

$$\Delta K_{th}^{0} = \begin{cases} 3{,}85 \text{ при } 20\,^{\circ}\text{C} \le T < 550\,^{\circ}\text{C} \\ 2{,}50 \text{ при } 550\,^{\circ}\text{C} \le T \le 600\,^{\circ}\text{C} \end{cases}, \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}; \quad \text{(B.13)}$$

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

Формула (В.12) применима для значений G_z в диапазоне от 4 до 8; если $G_z < 4$, расчет по формуле (В.12) проводится при $G_z = 4$. Если балл зерна в конструкторской документации не указан, то следует принимать G_z равным 8.

Приложение Г
(рекомендуемое)

Скорость роста трещины при ползучести

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

l — длина трещины, мм;

t — время, ч;

C^* — контурный интеграл, определяемый по формуле

$$C^* = \int_{\Gamma} \left(W^* n_1 - \sigma_{ij} n_j \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_1} \right) ds, \tag{Г.2}$$

где Г — криволинейный контур, начинающийся на одном берегу трещины и заканчивающийся на другом берегу трещины, по которому ведется 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 Г;

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
$450 \le T \le 600$	$5{,}8 \cdot 10^{-2}$	0,81
сталь марки 07Х12НМФБ		
$450 \le T \le 600$	$2{,}0 \cdot 10^{-1}$	0,9

Значение C^* может быть рассчитано 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 $\cdot \sqrt{\text{м}}$;

σ_{ref} — референсное напряжение, определяемое в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (приложение К), МПа;

ξ_{ref} — скорость ползучести необлученного материала, рассчитываемая согласно Д.2 (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, проводят по формуле (Д.12) (приложение Д), где вместо ξ_{eq} подставляют ξ_{ref}.

Скорость роста трещины при ползучести под действием нейтронного облучения определяют по формуле

$$\left(\frac{dl}{dt}\right)_{\text{обл}} = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \left(\frac{dl}{dt}\right)_{\text{исх}}, \tag{Г.4}$$

где ω_1 и ω_2 — параметры, увеличивающие скорость роста трещины при ползучести за счет облучения,

$$\omega_1 = 1 + 8 \cdot 10^{-4} \cdot k_1 \cdot \frac{dF}{dt}, \quad (Г.5)$$

$$\omega_2 = 1 + k_2 \cdot (0{,}22 \cdot F)^{n_\omega}. \quad (Г.6)$$

Значение k_1 рассчитывают по формулам:

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

$$k_1 = 1188 - 3{,}97 \cdot T + 3{,}34 \cdot 10^{-3} \cdot T^2, \ \frac{\text{ч}}{\text{сна}}; \quad (Г.7)$$

- для стали марки 08Х16Н11М3

$$k_1 = 1294 - 4{,}26 \cdot T + 3{,}52 \cdot 10^{-3} \cdot T^2, \ \frac{\text{ч}}{\text{сна}}. \quad (Г.8)$$

Значения k_2 и n_ω рассчитывают по формулам:

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

$$k_2 = 27{,}2 - 8{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot T + 7{,}06 \cdot 10^{-5} \cdot T_2; \ n_\omega = 1{,}362 - 1{,}72 \cdot 10 \cdot T; \quad (Г.9)$$

- для стали марки 08Х16Н11М3

$$k_2 = 2{,}42; \ n_\omega = 1{,}02 - 1{,}079 \cdot 10^{-3} \cdot T. \quad (Г.10)$$

Формулы (Г.5) и (Г.8) справедливы для диапазона температур от 450 °С до 600 °С, диапазона скоростей набора повреждающей дозы от 0 до 1 сна/год и диапазона повреждающих доз от 0 до 45 сна.

Если 450 °С < T < 500 °С, то расчет по формулам (Г.5) и (Г.6) проводится при T = 500 °С.

Приложение Д
(рекомендуемое)

Скорость ползучести

Д.1 В настоящем приложении применены следующие дополнительные обозначения:

ε_{ij}^{c} — компоненты тензора деформаций ползучести;

$d\varepsilon_{ij}^{c}$ — приращения компонент тензора деформаций ползучести;

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

ξ_{eq}^{c} — 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;

$k_{Ф}$ — коэффициент ускорения скорости ползучести при облучении;

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

$$d\varepsilon_{ij}^{c} = \frac{3}{2}\xi_{eq}^{c}\frac{\beta_{ij}}{\beta_{eq}}dt, \qquad (Д.1)$$

где

$$\xi_{eq}^{c} = \sqrt{\frac{2}{3}\xi_{ij}^{c}\xi_{ij}^{c}}; \qquad (Д.2)$$

$$\xi_{ij}^{c} = \frac{d\varepsilon_{ij}^{c}}{dt}; \qquad (Д.3)$$

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

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

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

$$\sigma_{m} = \frac{\sigma_{ij}}{3}; \qquad (Д.7)$$

$$d\rho_{ij} = \frac{3}{2}A_{1}\cdot d\varepsilon_{ij}^{c} - C\left(\sigma_{eq}\right)\cdot\frac{\beta_{ij}}{\beta_{eq}}dt; \qquad (Д.8)$$

$$C\left(\sigma_{eq}\right) = C_{1}\cdot\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{0}}\right)^{n_{c}}; \qquad (Д.9)$$

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

Интенсивность скорости деформации ползучести связана с интенсивностью активного напряжения формулой

$$\xi_{eq}^{c} = \Omega\cdot\left(\frac{\beta_{eq}}{\sigma_{0}}\right)^{n_{c}},\ ч^{-1}. \qquad (Д.11)$$

Значения констант A_{1}, C_{1}, Ω, n_{c} определяются в соответствии с ГОСТ Р 59115.10—2021 (приложение Е, пункт Е.6).

Скорость термоактивируемой ползучести для сталей марок 09Х18Н9, 10Х18Н9, 12Х18Н9, 08Х16Н11М3 при нейтронном облучении определяют по формуле

$$(\xi_{eq}^{c})^{обл} = \xi_{eq}^{c}\cdot k_{Ф},\ ч^{-1}, \qquad (Д.12)$$

где $k_\Phi = 1 + \frac{dF}{dt}\frac{1}{\Phi_\xi}\exp\left(\frac{Q_\Phi}{R_g T_a}\right)$;

R_g — универсальная газовая постоянная, R_g = 8,314 Дж/(К · моль);
$Q_\Phi = 7{,}75 \cdot 10^4$ Дж/моль;
Φ_ξ = 0,486 сна/ч;
σ_0 = 100 МПа.

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

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

Температура, К (°С)	A_1, $ч^{-1}$	Ω	n_c	C_1	a_c
Сталь 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	$7{,}13 \cdot 10^{-5}$	$8{,}70 \cdot 10^{-8}$
Сталь 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	$3{,}10 \cdot 10^{-3}$	$1{,}04 \cdot 10^{-6}$

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

$$\xi^c_{eqx} = \xi^c_{eq1}\left(\frac{\xi^c_{eq2}}{\xi^c_{eq1}}\right)^{\frac{(T_{ax}-T_{a1})\cdot T_{a2}}{(T_{a2}-T_{a1})\cdot T_{ax}}}, \qquad (Д.13)$$

где ξ^c_{eqx} — скорость ползучести при температуре T_{ax} ($T_{a2} > T_{ax} > T_{a1}$);
T_{ax}, T_{a1}, T_{a2} — абсолютные температуры в градусах К;
ξ^c_{eq1}; ξ^c_{eq2} — скорости ползучести, рассчитанные по формуле (Д.11) в соответствии с параметрами, указанными в таблице Д.1, при температурах T_{a1} и T_{a2} соответственно.

Примечание — Формула (Д.13) применяется для материала в исходном состоянии. Для определения скорости ползучести для облучаемого материала значение скорости, полученное по формуле (Д.13), умножается на коэффициент k_Φ.

Д.3 Скорость ползучести, используемая при расчете релаксации напряжений, определяют по формуле

$$\xi^c_{eq} = a_c \cdot \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0}\right)^{n_c}, \qquad (Д.14)$$

где σ_0 = 100 МПа.

Константы 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)

Радиационное распухание

Е.1 Радиационное распухание при заданном уровне напряжений σ_{eff} рассчитывают по формуле

$$S = S_0 \cdot f(\sigma_{eff}), \tag{Е.1}$$

где $f(\sigma_{eff})$ — функция учета влияния напряжения на распухание;

$$f(\sigma_{eff}) = \begin{cases} 1 + P \cdot \sigma_{eff} \text{ при } 1 + P \cdot \sigma_{eff} > 0 \\ 0 \text{ при } 1 + P \cdot \sigma_{eff} \le 0 \end{cases}; \tag{Е.2}$$

$$\sigma_{eff} = (1 - \eta) \cdot \sigma_m + \eta \cdot \sigma_{eq}; \tag{Е.3}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{ij}}{3}; \tag{Е.4}$$

$$P = 8{,}0 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}; \ \eta = 0{,}15;$$

σ_{ij} — компоненты тензора напряжений;

σ_{eq} — интенсивность напряжений, рассчитываемая по формуле (Д.10).

Е.2 Температурно-дозовая зависимость свободного радиационного распухания рассчитывают по формулам:

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

$$S_0 = c \cdot F^{n_v} \cdot \exp[-r(T_{\text{обл}} - T_m)^2], \tag{Е.5}$$

где $c = 1{,}63 \cdot 10^{-4}$ сна$^{-n_v}$; $n_v = 1{,}88$; $r = 1{,}1 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-2}$; $T_m = 470$ °С;

- для стали марки 08Х16Н11М3

$$S_0 = \begin{cases} c_{D1} \cdot F^n \cdot \exp\left[-r_1 \cdot \left(T_{\text{обл}} - T_{\max 1}\right)^2\right] \text{ при } T_{\text{обл}} \le T_{diff} \\ c_{D2} \cdot F^n \cdot \exp\left[-r_2 \cdot \left(T_{\text{обл}} - T_{\max 2}\right)^2\right] \text{ при } T_{\text{обл}} > T_{diff} \end{cases}, \tag{Е.6}$$

где $c_{D1} = 9{,}8 \cdot 10^{-5}$ сна$^{-n}$; $r_1 = 2{,}3 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-2}$; $T_{\max 1} = 470$ °С;
$c_{D2} = 9{,}6 \cdot 10^{-5}$ сна$^{-n}$; $r_2 = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-2}$; $T_{\max 2} = 565$ °С;
$n = 1{,}88$; $T_{diff} = 513$ °С.

Примечание — Расчет радиационного распухания проводят, если величина S_0, рассчитанная по формулам (Е.5) и (Е.6), превышает $1{,}0 \cdot 10^{-4}$.

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

[2] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-084-15 — Правила контроля основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей при эксплуатации оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.99

Ключевые слова: атомные энергетические установки, оборудование, трубопроводы, поверочный расчет, постпроектные стадии

Редактор *З.Н. Киселева*
Технический редактор *В.Н. Прусакова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 21.10.2021. Подписано в печать 17.11.2021. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,37.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.

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

gost.e-ecolog.ru