ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р 59115.14— 2021**

# ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

## Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора

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. № 1177-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

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

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

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2021

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

## Содержание

1 Область применения . . . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . . . 1
3 Термины и определения . . . . . 1
4 Сокращения и обозначения . . . . . 2
5 Общие положения . . . . . 4
6 Требования к исходным данным . . . . . 4
7 Условия прочности . . . . . 4
8 Расчетный дефект . . . . . 7
9 Расчетные характеристики . . . . . 11
Приложение А (обязательное) Скорость роста усталостных трещин при циклическом нагружении . . . . . 14
Приложение Б (обязательное) Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора ВВЭР-440 (В-230, В-179) . . . . . 15
Приложение В (обязательное) Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора ВВЭР-440 (В-213) . . . . . 18
Приложение Г (обязательное) Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора ВВЭР-1000 . . . . . 21
Приложение Д (обязательное) Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора ВВЭР-1200 и ВВЭР ТОИ . . . . . 27
Приложение Е (обязательное) Определение параметров температурной зависимости вязкости разрушения по результатам испытаний образцов свидетелей . . . . . 32
Приложение Ж (обязательное) Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора проектируемых реакторных установок ВВЭР . . . . . 33
Приложение И (обязательное) Расчет коэффициентов, учитывающих влияние коротких трещин и двухосного нагружения на вязкость разрушения . . . . . 36
Приложение К (обязательное) Вязкость разрушения основного металла и металла шва на верхнем шельфе . . . . . 38
Приложение Л (обязательное) Вязкость разрушения антикоррозионного покрытия (металла наплавки) . . . . . 39
Приложение М (справочное) Расчет коэффициентов интенсивности напряжений . . . . . 41
Приложение Н (справочное) Механические и теплофизические свойства материалов . . . . . 44
Приложение П (обязательное) Определение размера контура интегрирования . . . . . 48
Приложение Р (справочное) Остаточные напряжения . . . . . 50
Приложение С (обязательное) Коэффициенты запаса . . . . . 57
Приложение Т (обязательное) Оценка вязкого подроста трещины в металле наплавки за период протекания переходного режима . . . . . 58
Приложение У (справочное) Критическая температура хрупкости материалов в исходном состоянии . . . . . 59
Библиография . . . . . 60

## 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

## Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водо-водяного энергетического реактора

Rules for strength assessment of equipment and pipelines of nuclear power installations. Strength assessment of pressure water reactor vessel

**Дата введения — 2022—01—01**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает требования к проведению расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов водо-водяных энергетических реакторов, изготовленных из сталей ферритного класса для проектируемых и строящихся атомных энергетических установок, а также корпусов водо-водяных энергетических реакторов, находящихся в эксплуатации (ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ), в том числе прошедших отжиг.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 50.05.12—2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Контроль радиационного охрупчивания корпуса реактора атомной станции

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

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

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

**Издание официальное**

3.1 **отжиг металла:** Термическая обработка металла, заключающаяся в нагреве металла до температуры $T_{отж}$ с целью полного или частичного восстановления его свойств.

3.2 **облучаемая область:** Зона корпуса ректора, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

3.3 **облучаемая область, прошедшая отжиг:** Облучаемая область корпуса реактора, которая в процессе отжига подвергалась нагреву в интервале температур ($T_{отж}$ – 15) °С ≤ $T^*$ ≤ ($T_{отж}$ + 15) °С, где $T_{отж}$ — температура отжига, зависящая от материала корпуса реактора.

3.4 **облучаемая область, не прошедшая отжиг:** Облучаемая область корпуса реактора, которая в процессе отжига подвергалась нагреву до температуры $T^* < T_{отж}$.

3.5 **необлучаемая область:** Зона корпуса реактора, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов не превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

3.6 **флюенс нейтронов:** Количество быстрых нейтронов (нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ), которое проходит через единицу площади в течение времени облучения.

Примечание — Для областей корпуса реактора, не прошедших отжиг, отсчет флюенса выполняют с начала ввода в эксплуатацию реактора; для областей корпуса реактора, прошедших отжиг, отсчет флюенса выполняют с момента эксплуатации после отжига.

3.7 **хрупкий проскок трещины:** Подрост трещины, приводящий к снижению текущей нагрузки на 5 % и более при некотором увеличении перемещений, зависящем от жесткости испытательной машины.

3.8 **единая кривая (Advance Unified Curve):** Метод прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения, использующийся для материалов в любой степени охрупчивания.

3.9 **образцы свидетели:** Образцы, изготовленные из металла, идентичного металлу корпуса реактора, часть которых исследуется в исходном состоянии, а часть загружена в реактор и выдерживается в условиях, близких к условиям эксплуатации металла корпуса реактора, выгружается и исследуется для контроля изменений структуры и свойств металла корпуса реактора в процессе эксплуатации.

3.10 **критическая температура хрупкости:** Характеристика склонности материала к хрупкому разрушению, определяемая по результатам испытаний образцов на ударный изгиб.

## 4 Сокращения и обозначения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения и обозначения:

ГИ — гидравлические испытания;
ЗТВ — зона термического влияния;
КИН — коэффициент интенсивности напряжений;
КР — корпус реактора;
МКЭ — метод конечных элементов;
МН — металл антикоррозионной наплавки;
МРЗ — максимальное расчетное землетрясение;
МШ — металл сварного шва;
НДС — напряженно деформированное состояние;
ННУЭ — нарушение нормальных условий эксплуатации;
НУЭ — нормальные условия эксплуатации;
ОМ — сосновной металл;
ОН — остаточные напряжения;
ОС — образцы свидетели;
ПА — проектная авария;
ПЗ — проектное землетрясение;
РУ — реакторная установка;
ТУ — технические условия;
$a$ — размер малой полуоси постулированного полуэллиптического или четвертьэллиптического дефекта, мм;
$c$ — размер большой полуоси постулированного полуэллиптического или четвертьэллиптического дефекта, мм;
$a_0$, $c_0$ — начальные значения размеров $a$ и $c$ соответственно, мм;

$a_р$, $c_р$ — расчетные значения размеров $a$ и $c$ соответственно, мм;

$n_i$, $n_J$, $n_T$ — коэффициенты запаса;

$A_F$ — коэффициент радиационного охрупчивания, °С;

$B_р$ — длина фронта трещины, расположенного в ОМ и (или) в МШ, мм;

$\bar{B}$ — референсная длина фронта трещины, $\bar{B} \equiv 25$, мм;

$B$ — толщина образца на трещиностойкость без боковых канавок, мм;

$B_N$ — для образцов с боковыми канавками — расстояние между вершинами боковых канавок, для образцов без канавок — $B_N = B$;

$E$ — модуль упругости, МПа;

$F$ — флюенс нейтронов, нейтр./м$^2$;

$J_C$ — критическое значение $J$-интеграла, Н/мм;

$J_C^{20}$ — значение $J_C$ при $T = 20$ °С, Н/мм;

$J_C^{ск}$ — минимальное значение $J_C^{20}$, при котором отсутствуют хрупкие скачки трещины в МН, Н/мм;

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

$K_J$ — КИН, рассчитанный на основании значения $J$-интеграла, МПа · $\sqrt{м}$ ;

$K_{JC}$ — вязкость разрушения (статическая трещиностойкость), МПа · $\sqrt{м}$ ;

$\bar{K}_{JC}$ — вязкость разрушения при протяженности фронта трещины $B = \bar{B} \equiv 25$ мм и $P_f = 0{,}05$, МПа · $\sqrt{м}$ ;

$K_{JC(med)}$ — медианное значение вязкости разрушения (при вероятности хрупкого разрушения $P_f = 0{,}5$), МПа · $\sqrt{м}$ ;

$K_{JC}^{shelf}$ — нижний шельф зависимости вязкости разрушения $K_{JC}(T)$, равный минимальному значению медианной зависимости $K_{JC}(T)$ в области хрупкого разрушения;

$K_{JC}^{ВШ}$ — верхний шельф зависимости вязкости разрушения равен $K_{JC}(T)$ в области вязкого разрушения;

$K_C$ — вязкость разрушения при длине фронта дефекта $B = B_р$ и $P_f = 0{,}05$ с учетом влияния эффекта коротких трещин и двухосного нагружения, рассчитанная на основании вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}$, МПа · $\sqrt{м}$ ;

$K_{min}$ — минимальное значение вязкости разрушения, МПа · $\sqrt{м}$ ;

$P_f$ — вероятность хрупкого разрушения;

$R_{p0,2}(T,F)$ — предел текучести при температуре Т и флюенсе нейтронов $F$, МПа;

$S_{КР}$ — толщина стенки рассматриваемого элемента КР без наплавки, мм;

$S_Н$ — толщина антикоррозионной наплавки, мм;

$T$ — температура, °С;

$T_{исп}$ — температура испытания, °С;

$T_{отж}$ — назначенная температура отжига, °С;

$T_к$ — критическая температура хрупкости, °С;

$T_{к0}$ — критическая температура хрупкости для материала в исходном состоянии, °С;

$T_{к0}^{ТУ}$ — нормативное значение $T_{к0}$ согласно техническим условиям на материал, °С;

$T_{к0}^{pas}$ — значение критической температуры хрупкости для материала рассматриваемого элемента согласно паспорту на КР, °С;

$T_{100}$ — значение температуры, при которой для образцов толщиной $B = 25$ мм и вероятности разрушения $P_f = 0{,}5$ величина $K_{JC} = 100$ МПа · $\sqrt{м}$ в соответствии с методом Advanced Unified Curve, °С;

$T_{100}^{start}$ — значение $T_{100}$ для ОМ и МШ в исходном состоянии для не отжигаемых областей, °С;

$T_{100}^{restart}$ — значение $T_{100}$ в момент начала эксплуатации после последнего отжига, °С;

$\delta T_{type}$ — температурный запас на тип образца, °С;

$\delta T_к$ — температурный запас на погрешность прогнозирования $\Delta T_{100}$ в дозо-временных зависимостях, °С;

$\delta T_{NH}$ — температурный запас на пространственную неоднородность металла корпуса реактора, °С;

$\delta T_{cr\text{-}ch}$ — разность между $T_к$ и $T_{100}$, в общем случае зависящая от материала, °С;

$\Delta T_к$ — сдвиг критической температуры хрупкости, обусловленный термическим старением и нейтронным облучением, °С;

$\Delta T_{100}$ — сдвиг температуры $T_{100}$, обусловленный термическим старением и нейтронным облучением, °С;

$\Delta T_F$ — сдвиг $T_{100}$ вследствие нейтронного облучения за время эксплуатации КР после последнего отжига для отжигаемых областей, или за все время эксплуатации для неотжигаемых областей, °С;

$\Delta T_T$ — сдвиг $T_{100}$, обусловленный термическим старением, за время эксплуатации КР после последнего отжига для отжигаемых областей, или за все время эксплуатации для неотжигаемых областей, °С;

$[p]$ — допускаемое значение давления в корпусе реактора;

$\nu$ — коэффициент Пуассона;

$\omega$, $\omega_b$ — коэффициенты, учитывающие влияние эффекта коротких трещин и двухосного нагружения на вязкость разрушения соответственно;

$\Omega_{расч}$ — параметр материала, характеризующий температурную зависимость вязкости разрушения материала, МПа $\cdot \sqrt{м}$;

$\tau$ — рассматриваемый момент времени.

## 5 Общие положения

5.1 Расчет на сопротивление хрупкому разрушению элементов КР следует проводить для всех проектных режимов эксплуатации с учетом нагрузок, предусмотренных для оборудования и трубопроводов атомных станций федеральными нормами и правилами, регламентирующими требования к обоснованию сейсмостойкости элементов атомных станций [1].

Параметры расчетных режимов эксплуатации определяет разработчик проекта РУ с учетом [1].

5.2 Прочность КР по критериям сопротивления хрупкому разрушению считается обеспеченной, если в результате расчета, выполненного в соответствии с положениями настоящего стандарта, будут обеспечены условия прочности, приведенные в разделе 7.

## 6 Требования к исходным данным

6.1 Распределение флюенса нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ на внутренней поверхности КР определяют расчетным методом.

Для КР, находящихся в эксплуатации, результаты расчета должны быть подтверждены сравнением с экспериментальными данными в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12—2018 (пункт 8.3.2.4).

6.2 Для каждого из расчетных режимов эксплуатации для рассматриваемых моментов времени протекания процесса $\tau_1$, $\tau_2$, ..., $\tau_N$ определяют распределение температур и напряжений по толщине стенки КР в анализируемой зоне. При определении напряжений учитывают остаточные и эксплуатационные напряжения в ОМ, МШ и МН.

6.3 Расчет на сопротивление хрупкому разрушению следует проводить для зон КР, где имеются наибольшие значения КИН $K_J$, или наименьшие значения допускаемой вязкости разрушения $[K_{JC}]$, или наименьшее значение отношения $[K_{JC}]/K_J$ в какой либо из моментов времени протекания расчетных режимов эксплуатации.

6.4 При выборе характеристик свойств материалов, необходимых для проведения расчета, используют расчетные или экспериментальные данные, приведенные в приложениях А—Л.

## 7 Условия прочности

7.1 Анализ условий прочности следует проводить для расчетного дефекта глубиной $a_p$ для каждого расчетного режима, определенного согласно разделу 5, и для каждой выбранной зоны КР.

7.2 При анализе условий прочности расчеты проводят для варьируемой глубины расчетного дефекта $a_p$ в следующих диапазонах:

- для поверхностного расчетного дефекта глубину $a_p$ варьируют от $S_Н$ (или от 0 для КР без наплавки) до $a_p^{max}$ при постоянном значении $c_p = c_p^{max}$ (см. раздел 8);

- для поднаплавочного расчетного дефекта размер малой полуоси $a_p$ варьируют от 0 до $a_p^{max}$ при постоянном значении $c_p = c_p^{max}$ (см. раздел 8).

Шаг варьирования глубины дефекта должен обеспечивать нахождение максимальных значений КИН.

Для каждого значения $a_p$ вычисляют длину $B_p$, той части фронта расчетного дефекта, которая расположена в ОМ и (или) МШ. $B_p$ вычисляют как длину дуги полуэллиптического или четвертьэллиптического дефекта за вычетом длины дуги, расположенной в антикоррозионной наплавке.

7.3 Условия прочности считают выполненными, если для каждого рассматриваемого момента времени $\tau$ протекания расчетного режима выполнены условия (7.1), (7.5) и (7.6).

7.3.1 Для фронта расчетного дефекта, находящегося в ОМ и (или) МШ, должно выполняться условие

$$\frac{1}{B_р}\int_0^{B_р} Z dL < 1, \tag{7.1}$$

где $B_р$ — длина той части фронта трещины, которая расположена в ОМ и (или) МШ;

$L$ — криволинейная координата фронта трещины (см. рисунок 7.1);

$Z$ — параметр, характеризующий состояние каждой точки фронта расчетной трещины в зависимости от максимальной величины параметра $\alpha$ за весь период нагружения от 0 до рассматриваемого момента времени $\tau$.

Для режимов ПА, НУЭ + МРЗ, ННУЭ + МРЗ, НУЭ + ПА + ПЗ для каждого значения $L$ параметр $Z$ в формуле (7.1) вычисляют по формуле

$$Z = \max_{(0,\tau)}\{\alpha\}, \tag{7.2}$$

где $\alpha$ — параметр, который для каждого значения $L$ вычисляют по формуле

$$\alpha = \begin{cases} \left(\dfrac{n_i \cdot K_J(L,\tau) - K_{min}}{K_C(L,\tau) - K_{min}}\right)^4, & \text{если } K_J(L,\tau) \geq 0{,}9 \cdot K_{max}(L,\tau) \text{ и } \dot{K}_J(L,\tau) \geq 0 \\ 0, & \text{если } K_J(L,\tau) < 0{,}9 \cdot K_{max}(L,\tau) \text{ или } \dot{K}_J(L,\tau) < 0 \end{cases}; \tag{7.3}$$

$n_i$ — коэффициент запаса, определяемый в соответствии с приложением С;

$K_J(L, \tau)$ — распределение $K_J$ по фронту трещины в момент времени $\tau$ (см. рисунок 7.1);

$K_{min}$ — минимально возможная вязкость разрушения, $K_{min}$ = 20 МПа $\cdot \sqrt{м}$;

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

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

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

Значение $K_C$ вычисляют по формуле (9.5).

Примечание — $K_J$ — КИН, определяемый методами как линейной, так и нелинейной механики разрушения с учетом зависимости свойств материала от температуры и с учетом остаточных напряжений (см. приложения М—Р).

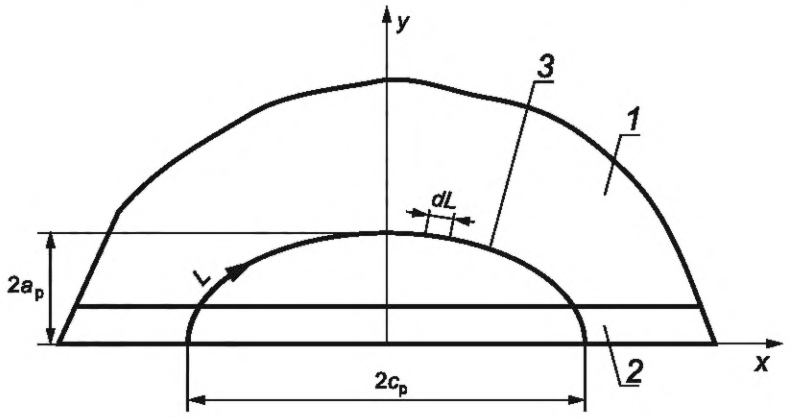
Для всех режимов, кроме ПА, НУЭ + МРЗ, ННУЭ + МРЗ, НУЭ + ПА + ПЗ, для каждого значения $L$ параметр $Z$ в формуле (7.1) вычисляют по формуле

$$Z = \left(\frac{n \cdot K_J(L) - K_{min}}{K_C - K_{min}}\right)^4, \tag{7.4}$$

где $K_J(L)$ — распределение $K_J$ при расчетной температуре в зависимости от координаты $L$ (координата $L$ представлена на рисунке 7.1).

Значение $K_C$ при расчетной температуре вычисляют по формуле (9.5).

Примечание — При расчетах по формулам (7.3) и (7.4) в случае, когда $n_i \cdot K_J < K_{min}$, принимают $n_i \cdot K_J = K_{min}$.




*1* — основной металл или металл шва; *2* — антикоррозионная наплавка; *3* — фронт трещины

Рисунок 7.1 — Схематизация расчетной поверхностной полуэллиптической трещины

7.3.2 Для каждой точки фронта расчетного дефекта, находящейся в МН, должно выполняться условие

$$n_J \cdot K_J \le K_{JC}, \tag{7.5}$$

где $n_J$ — коэффициент запаса для металла наплавки, определяемый в соответствии с приложением С;

$K_{JC} = \sqrt{J_C \cdot E / (1 - \nu^2)}$;

$J_C$ — критическое значение $J$-интеграла (см. приложение Л);

$E$ — модуль упругости;

$\nu$ — коэффициент Пуассона.

При $J_C^{20} \ge J_C^{ск}$ для режимов ПА, НУЭ + МРЗ, ННУЭ + МРЗ, НУЭ + ПА + ПЗ выполнение условия (7.5) не требуется. Величины $J_C^{20}$ и $J_C^{ск}$ определяют в соответствии с приложением Л.

7.3.3 Для режимов ПА, НУЭ + МРЗ, ННУЭ + МРЗ, НУЭ + ПА + ПЗ для поднаплавочной трещины дополнительно должно выполняться условие

$$\Delta a_1 + \Delta a_{вяз} < S_H/2, \tag{7.6}$$

где $\Delta a_{вяз}$ — максимальный вязкий подрост трещины в сторону малой полуоси (вязкий подрост трещины в МН) при нестационарном нагружении за период протекания режимов из группы 3 (см. приложение С);

$\Delta a_1$ — циклический подрост трещины в МН за проектный период работы, определяемый в соответствии с приложением А.

Значение $\Delta a_{вяз}$ определяют в соответствии с приложением Т.

При невыполнении условия (7.6) в качестве расчетного дефекта принимают поверхностную полуэллиптическую трещину и анализируют условия (7.1)—(7.3).

7.4 Коэффициенты запаса $n_i$ и $n_J$ определяют в соответствии с приложением С.

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

Условия прочности считаются выполненными, если для каждого рассматриваемого момента времени $\tau$ протекания расчетного режима выполнены следующие условия:

- для каждой точки фронта расчетного дефекта, находящейся в ОМ и (или) МШ, выполнено условие

$$n_i \cdot K_J \le K_C, \tag{7.7}$$

исключая те моменты времени, когда выполняется условие $\dot{K}_J < 0$ или $K_j < 0{,}9 \cdot K_{max}(L, \tau)$, где $K_{max}(L, \tau) = \max\limits_{(0,\tau)}\left[K_J(L, \tau)\right]$ — распределение максимального значения $K_J$ по фронту трещины за период нагружения от 0 до текущего момента времени;

- для каждой точки фронта расчетного дефекта, находящейся в МН, выполнены условия пунктов 7.3.2 или 7.3.3.

В формуле (7.7) $K_C$ вычисляют по формуле (9.5).

### 7.6 Определение допускаемого давления в КР

7.6.1 Допускаемое давление в КР [$p$] определяют на основании анализа выполнения условия прочности (7.1), в котором для каждого значения $L$ параметр $Z$ вычисляют по формуле (7.4).

7.6.2 При проведении упрощенной консервативной оценки допускаемое давление [$p$] вычисляют по формуле

$$[p] = [K_C/n_i - K_J^T - K_J^{OH}]/K_J^{p=1}, \quad (7.8)$$

где $K_J^T$ — КИН от действия температурной нагрузки;

$K_J^{OH}$ — КИН от действия остаточных напряжений;

$K_J^{p=1}$ — нормированный КИН от действия внутреннего давления величиной 1 МПа.

Значения $K_C$, $K_J^T$, $K_J^{OH}$, $K_J^{p=1}$ в формуле (7.6) вычисляют для наиболее глубокой точки фронта расчетного дефекта, находящейся в ОМ или МШ.

7.6.3 При допускаемом давлении, рассчитанном согласно 7.6.1 или 7.6.2, для МН должны выполняться условия прочности согласно 7.3.2 и 7.3.3.

## 8 Расчетный дефект

8.1 В качестве расчетного дефекта рассматривают плоские поверхностные и поднаплавочные полуэллиптические и четвертьэллиптические трещины, ориентированные в одном из двух направлений.

Трещина, расположенная в плоскости, которой принадлежит ось симметрии КР, обозначается как «осевая».

Трещина, расположенная в плоскости, перпендикулярной плоскости осевой трещины, обозначается как «окружная».

Примеры расположения осевых трещин в различных частях КР показаны на рисунках 8.1—8.4.

8.2 Для КР с антикоррозионной наплавкой рассматривают следующие варианты выбора расчетного дефекта.

8.2.1 В случае, если контроль состояния металла антикоррозионной наплавки неразрушающими методами в процессе эксплуатации в рассматриваемой зоне КР не проводится, в качестве расчетного дефекта выбирают поверхностные полуэллиптические трещины с начальной глубиной $a_0 = S_H + 0{,}07S_{KP}$ и протяженностью $2c_0 = 6a_0$ [см. рисунок 8.1а)] или четвертьэллиптические трещины с начальной глубиной $a_0 = S_H + 0{,}07S_{KP}$ и протяженностью $c_0 = 3a_0$ [см. рисунок 8.2а)]. Если величина $0{,}07S_{KP} > 15$ мм, то принимают $a_0 = S_H + 15$ мм.

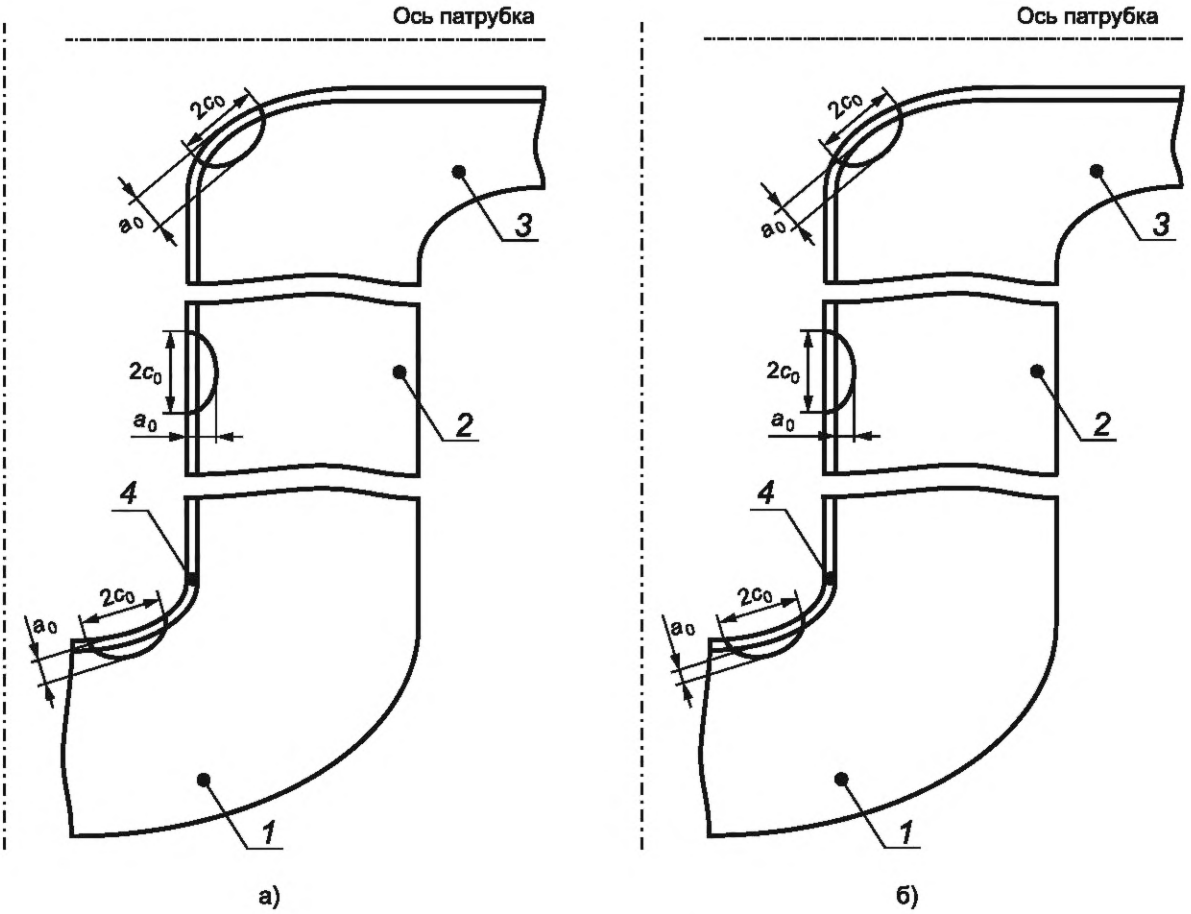
При нагрузках, соответствующих режимам НУЭ, ГИ и ННУЭ, определяют подрост глубины трещины $\Delta a$ и протяженности в обе стороны большой оси $\Delta c_1$ и $\Delta c_2$ (для четвертьэллиптический трещины в одну сторону оси $\Delta c_1$) при циклическом нагружении за рассматриваемый период эксплуатации и окончательно устанавливают максимальные размеры расчетного дефекта:

$$a_p^{max} = a_0 + \Delta a, \quad (8.1)$$

$$2c_p^{max} = 2c_0 + \Delta c_1 + \Delta c_2. \quad (8.2)$$

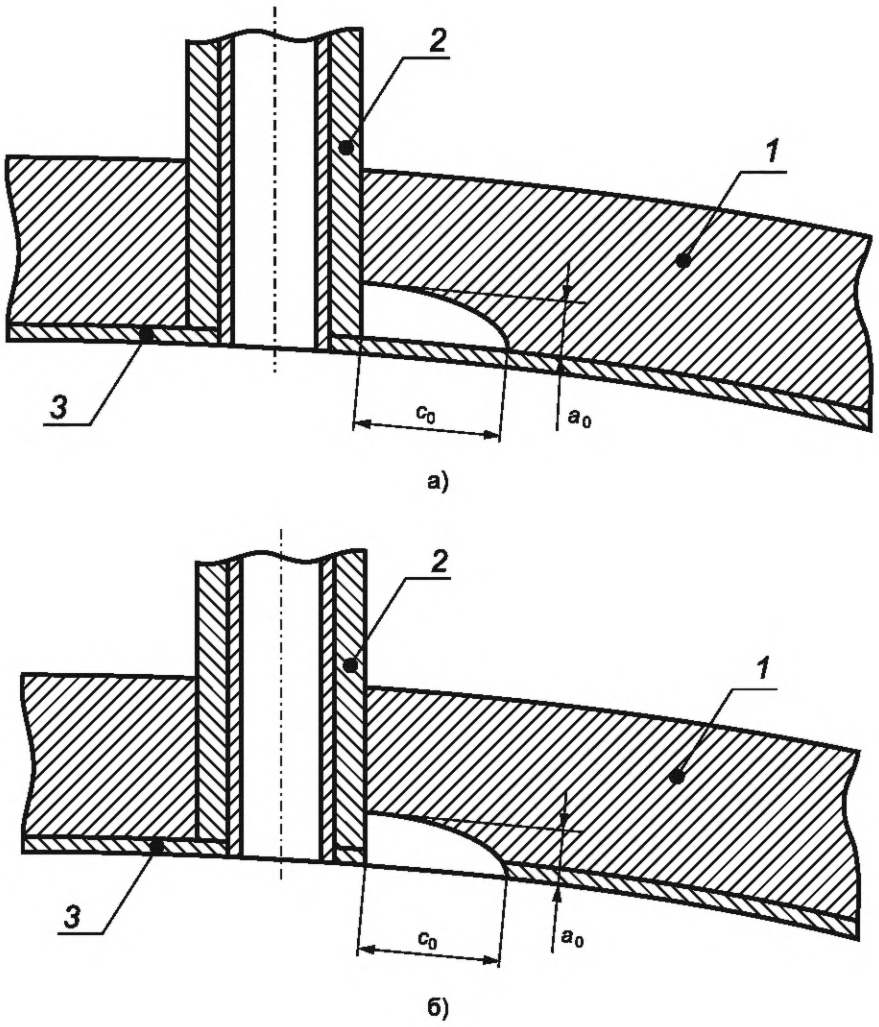
8.2.2 В случае, если контроль состояния металла антикоррозионной наплавки неразрушающими методами в процессе эксплуатации в рассматриваемой зоне КР регулярно проводится и при этом отсутствуют дефекты, превышающие по своим размерам допускаемые значения, установленные в [2], или все обнаруженные дефекты, превышающие по своим размерам допускаемые значения, установленные в [2], отремонтированы, то в качестве расчетного дефекта принимают поднаплавочные полуэллиптические трещины с начальной глубиной $a_0 = 0{,}07S_{KP}$ и протяженностью $2c_0 = 6a_0$ [см. рисунок 8.1б)] или четвертьэллиптические трещины с начальной глубиной $a_0 = 0{,}07S_{KP}$ и протяженностью $c_0 = 3a_0$ [см. рисунок 8.2б)]. Если $a_0 > 15$ мм, то принимают $a_0 = 15$ мм.

Если какое либо из условий по наличию и ремонту обнаруженных дефектов не выполнено, то расчетный дефект определяют согласно 8.2.1.



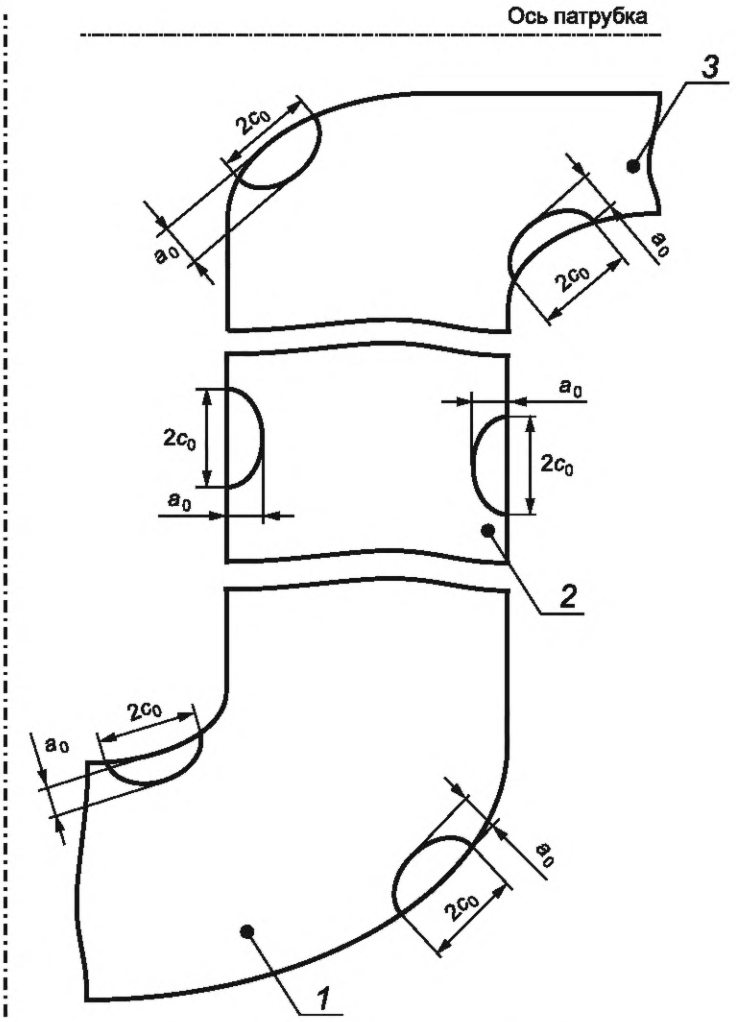

*1* — днище; *2* — цилиндрическая часть КР; *3* — патрубок; *4* — антикоррозионная наплавка

Рисунок 8.1 — Примеры расположения поверхностных а) и поднаплавочных б) расчетных дефектов в виде осевой полуэллиптической трещины в КР с антикоррозионной наплавкой



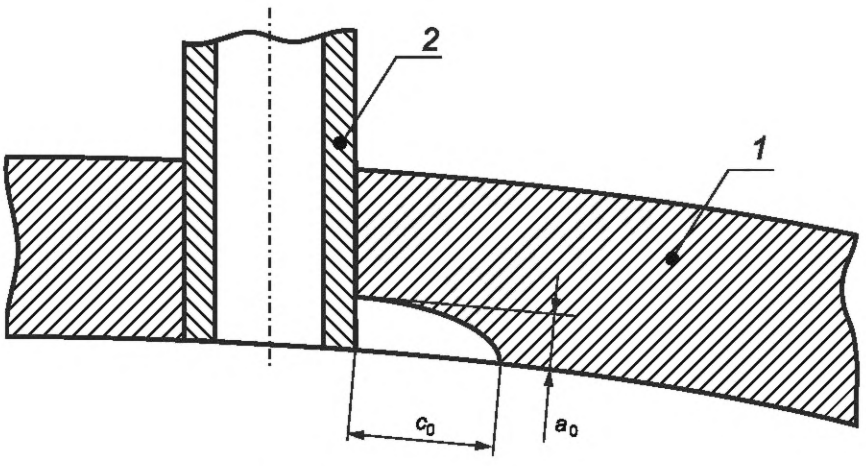

*1* — крышка реактора; *2* — патрубок; *3* — антикоррозионная наплавка

Рисунок 8.2 — Примеры расположения поверхностных а) и поднаплавочных б) расчетных дефектов в виде осевой четвертьэллиптической трещины в крышке реактора с антикоррозионной наплавкой




*1* — днище; *2* — цилиндрическая часть КР; *3* — патрубок

Рисунок 8.3 — Примеры расположения поверхностных расчетных дефектов в виде осевой полуэллиптической трещины в КР без антикоррозионной наплавки




*1* — крышка реактора; *2* — патрубок

Рисунок 8.4 — Пример расположения расчетного четвертьэллиптического дефекта в крышке реактора без антикоррозионной наплавки

При нагрузках, соответствующих режимам НУЭ, ГИ и ННУЭ, определяют подрост глубины трещины в обе стороны малой полуоси $\Delta a_1$ и $\Delta a_2$ и подрост протяженности трещины в обе стороны большой оси $\Delta c_1$ и $\Delta c_2$ (для четвертьэллиптического дефекта — в обе стороны большой полуоси) при циклическом нагружении за рассматриваемый период эксплуатации и окончательно устанавливают максимальные размеры расчетного дефекта:

$$a_p^{max} = a_0 + \Delta a_1 + \Delta a_2, \quad (8.3)$$

$$2c_p^{max} = 2c_0 + \Delta c_1 + \Delta c_2. \quad (8.4)$$

Трещина с размерами $a_p^{max}$ и $2c_p^{max}$ располагается таким образом, чтобы полуэллиптический (или четвертьэллиптический) фронт трещины находится в ОМ и (или) МШ [см. рисунок 8.1б)].

8.3 Для КР без наплавки в качестве исходного постулируемого расчетного дефекта принимают плоские поверхностные полуэллиптические или четвертьэллиптические трещины с двумя различными ориентациями согласно 8.1 с начальной глубиной $a_0 = 0{,}07S_{КР}$ и протяженностью $2c_0 = 6a_0$ (см. рисунки 8.3 и 8.4). Если величина $0{,}07 \cdot S_{КР} > 15$ мм, то принимают $a_0 = 15$ мм.

При нагрузках, соответствующих режимам НУЭ, ГИ и ННУЭ, определяют подрост глубины трещины $\Delta a$ и протяженности в обе стороны большой оси $\Delta c_1$ и $\Delta c_2$ (для четвертьэллиптического дефекта в обе стороны большой полуоси) при циклическом нагружении за рассматриваемый период эксплуатации и устанавливают следующие максимальные размеры расчетного дефекта:

$$a_p^{max} = a_0 + \Delta a, \quad (8.5)$$

$$2c_p^{max} = 2c_0 + \Delta c_1 + \Delta c_2. \quad (8.6)$$

8.4 При расчете циклического подроста трещины используют зависимости скорости роста трещины в соответствии с приложением А.

8.5 При расчете циклического подроста расчетной трещины на стадии эксплуатации используют фактическое количество и параметры режимов, реализованных от начала эксплуатации до рассматриваемого момента, и прогнозируемое количество и параметры режимов на последующий период эксплуатации.

8.6 Для получения упрощенной консервативной оценки для крышки реактора допускается принимать следующие размеры расчетных дефектов $a_p^{max} = 0{,}25S_{КР}$, $c_p^{max} = 3\ a_p^{max}$.

## 9 Расчетные характеристики

### 9.1 Вязкость разрушения

9.1.1 При расчете на сопротивления хрупкому разрушению КР проводят анализ развития расчетного дефекта с использованием данных по вязкости разрушения ОМ, МШ и МН, полученных по аналитическим зависимостям или на основании испытаний ОС.

9.1.2 Для описания вязкости разрушения ОМ и МШ используют следующие основные положения.

9.1.2.1 Хрупкое разрушение рассматривают как стохастический процесс. Разброс данных по вязкости разрушения в области хрупкого разрушения описывается распределением Вейбулла.

9.1.2.2 При охрупчивании материала происходит смещение кривой вязкости разрушения $K_{JC}(T)$ в область повышенных температур, сопровождающееся изменением формы этой кривой.

9.1.2.3 Вероятность хрупкого разрушения $P_f$ при $K_J \le K_{JC}$ для образца, выбранного случайным образом из партии образцов, описывает трехпараметрическое распределения Вейбулла по формуле

$$P_f = 1 - \exp\left[-\left(\frac{K_{JC} - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right)^4\right], \quad (9.1)$$

где $K_{min}$ — минимально возможная вязкость разрушения, $K_{min} = 20$ МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$;

$K_0$ — параметр масштаба, зависящий от температуры и толщины образца, который вычисляют на основании значения $K_{JC(med)}$ [см. формулу (9.3)] по формуле $K_0 = K_{min} + (K_{JC(med)} - K_{min})/[\ln(2)]^{1/4}$.

В формуле (9.1) $K_{JC}$ — вязкость разрушения, определяемая методами как линейной ($K_{JC}$), так и нелинейной ($K_{JC}$) механики разрушения.

9.1.2.4 Влияние длины фронта трещины на вязкость разрушения описывает формула

$$\frac{K_{JC}^{X} - K_{\min}}{K_{JC}^{Y} - K_{\min}} = \left(\frac{B_Y}{B_X}\right)^{1/4}, \quad (9.2)$$

где $K_{JC}^{X}$, $K_{JC}^{Y}$ — значения вязкости разрушения для образцов с длиной фронта трещины $B_X$ и $B_Y$ (для образцов с боковыми канавками — расстояние между вершинами боковых канавок; для образцов без боковых канавок — толщина образца), при одной и той же вероятности $P_f$.

9.1.2.5 Температурную зависимость медианного значения вязкости разрушения $K_{JC(med)}$ при $B_N$ = 25 мм согласно методу Advanced Unified Curve описывает формула

$$K_{JC(med)} = K_{JC}^{shelf} + \Omega \cdot a_1 \cdot \left[1 + \text{th}\left(\frac{T - a_2}{a_3}\right)\right], \quad (9.3)$$

где $K_{JC(med)}$ — медианное (соответствующее вероятности хрупкого разрушения 0,5) значение вязкости разрушения $K_{Jc}$, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ ;

$K_{JC}^{shelf}$ — уровень нижнего шельфа зависимости вязкости разрушения $K_{JC}(T)$ (температурно-независимая составляющая вязкости разрушения при длине фронта трещины 25 мм и вероятности хрупкого разрушения 0,5), МПа · $\sqrt{\text{м}}$ ;

$\Omega$ — параметр, определяющий вид температурной зависимости $K_{JC}(T)$, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ ;

$a_1$ — коэффициент, ед.;

$a_2$, $a_3$ — коэффициенты, °С.

В формуле (9.3) значение $K_{JC}^{shelf}$ следует принимать равным 30 МПа · $\sqrt{\text{м}}$ .

В случае, если $T \le 130$ °С, следует принимать $a_1$ = 1, $a_2$ = 130 °С, $a_3$ = 105 °С; если $T > 130$ °С — $a_1$ = 1,99, $a_2$ = 216 °С, $a_3$ = 157 °С.

Принимают, что при охрупчивании материала в формуле (9.3) изменяется только параметр $\Omega$.

9.1.2.6 Параметр $\Omega$ для материала, охрупченного в процессе эксплуатации, вычисляют по формуле

$$\Omega = \frac{70}{a_1 \cdot \left(1 + \text{th}\left(\frac{T_{100} - a_2}{a_3}\right)\right)}, \quad (9.4)$$

где температуру $T_{100}$ вычисляют из условия $K_{JC(med)}(T = T_{100}) = 100$ МПа · $\sqrt{\text{м}}$ для $B$ = 25 мм.

9.1.2.7 Для расчета на сопротивление хрупкому разрушению в качестве входной информации используют температурную зависимость вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$ для длины фронта трещины (толщины образца) $B$ = 25 мм и $P_f$ = 0,05.

Для расчета $\bar{K}_{JC}(T)$ применяют формулы (9.1) и (9.3).

9.1.2.8 В качестве расчетной зависимости вязкости разрушения ОМ и МШ для расчетного дефекта с длиной фронта $B = B_p$ и $P_f$ = 0,05 принимают зависимость вязкости разрушения $K_C$ в виде

$$K_C = \omega \cdot \omega_b \cdot \left(\left(\frac{\bar{B}}{B_p}\right)^{1/4} \cdot (\bar{K}_{JC} - K_{\min}) + K_{\min}\right), \quad (9.5)$$

где $\bar{K}_{JC}$ — вязкость разрушения для длины фронта трещины $\bar{B}$ = 25 мм и $P_f$ = 0,05, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ ;

$B_p$ — длина той части фронта расчетного дефекта, которая расположена в ОМ и (или) МШ;

$\omega$, $\omega_b$ — коэффициенты, учитывающие влияние коротких трещин и двухосного нагружения на вязкость разрушения соответственно;

$K_{\min}$ — минимально возможная вязкость разрушения, $K_{\min}$ = 20 МПа · $\sqrt{\text{м}}$ .

При расчете по формуле (9.5), если $B_p > 200$ мм, принимают $B_p$ = 200 мм.

Значение $\bar{K}_{JC}$ ОМ и МШ КР реакторных установок ВВЭР, находящихся в эксплуатации, определяют:

- для ВВЭР-440 (В-230, В-179) — в соответствии с приложением Б;
- для ВВЭР-440 (В-213) — в соответствии с приложением В с учетом положений приложения Е;

- для ВВЭР-1000 — в соответствии с приложением Г с учетом положений приложения Е;
- для ВВЭР-1200 и ВВЭР ТОИ — в соответствии с приложением Д с учетом положений приложения Е.

Значение $\overline{K}_{JC}$ ОМ и МШ КР проектируемых реакторных установок ВВЭР определяют в соответствии с приложением Ж.

Значения $\omega$ и $\omega_b$ определяют в соответствии с приложением И.

Примечание — Если значение $K_C$ превышает значение вязкости разрушения на верхнем шельфе $K_C > K_{JC}^{\text{ВШ}}$, то принимают $K_C = K_{JC}^{\text{ВШ}}$. Значение $K_{JC}^{\text{ВШ}}$ определяют в соответствии с приложением К.

9.1.3 Вязкость разрушения антикоррозионной наплавки не подчиняется закономерностям, изложенным в 9.1.2, и не зависит от длины фронта трещины. Вязкость разрушения облученного металла антикоррозионной наплавки определяют в соответствии с приложением Л.

### 9.2 Коэффициенты интенсивности напряжений

9.2.1 Расчет КИН целесообразно выполнять численными методами с использованием *J*-интеграла. Для получения консервативной оценки допускается выполнять расчет КИН методами линейной механики разрушения в соответствии с приложением М. Определение пределов применимости линейной механики разрушения выполняют в соответствии с приложением М.

9.2.2 Расчет $K_J$ выполняют по результатам анализа напряженно деформированного состояния узла на расчетном режиме и параметров расчетного дефекта. Для нестационарных режимов расчет НДС и $K_J$ выполняют для всего интервала времени прохождения режима с шагом по времени, обеспечивающим нахождение экстремальных значений $K_J$.

9.2.3 Расчет $K_J$ выполняют с использованием значений характеристик механических свойств материалов КР для рассматриваемого срока эксплуатации. Характеристики механических свойств целесообразно определять по результатам испытаний ОС в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12. Допускается использовать значения характеристик механических свойств, приведенные в приложении Н.

9.2.4 При определении КИН численными методами расчет *J*-интеграла выполняют по всему фронту расчетного дефекта. Размер контура интегрирования определяют в соответствии с приложением П.

### 9.3 Остаточные напряжения

Остаточные напряжения должны быть определены с учетом процессов сварки, наплавки, термообработки, а также ГИ.

Допускается принимать распределения ОН по толщине стенки КР в соответствии с рекомендациями, приведенными в приложении Р.

## Приложение А
## (обязательное)

## Скорость роста усталостных трещин при циклическом нагружении

Для модификаций сталей марок 15Х2МФА и 15Х2НМФА, их сварных швов и металла антикоррозионной наплавки (1-й слой наплавки Св-07Х25Н13, 2-й слой наплавки Св-04Х20Н10Г2Б) скорости роста усталостной трещины $da/dN$ и $dc/dN$, м/цикл, вычисляют по формулам (А.1)—(А.6).

### А.1 Металл антикоррозионной наплавки

А.1.1 Скорость роста усталостной трещины для металла антикоррозионной наплавки на воздухе вычисляют по формуле

$$\frac{da}{dN}, \frac{dc}{dN} = 5{,}2 \cdot 10^{-12} \cdot \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^{0{,}25}} \right)^{3{,}3}, \qquad (А.1)$$

где $a$, $c$ — текущие размеры малой и большой полуосей постулированного дефекта соответственно, м;

$N$ — количество циклов нагружения;

$\Delta K$ — размах КИН, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ ($\Delta K = K_{max}^{цикл} - K_{min}^{цикл}$, где $K_{max}^{цикл}$ и $K_{min}^{цикл}$ — максимальное и минимальное значения КИН соответственно, полученные на основе решения термодеформационной задачи в упругой постановке, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$);

$R$ — коэффициент асимметрии нагружения ($R = K_{min}^{цикл} / K_{max}^{цикл}$).

А.1.2 Скорость роста усталостной трещины для металла антикоррозионной наплавки в коррозионной среде первого контура вычисляют по формуле

$$\frac{da}{dN}, \frac{dc}{dN} = 1{,}56 \cdot 10^{-11} \cdot \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^{0{,}25}} \right)^{3{,}3}. \qquad (А.2)$$

### А.2 Основной металл и металл шва

А.2.1 Скорость роста усталостной трещины для ОМ и МШ на воздухе вычисляют по формуле

$$\frac{da}{dN}, \frac{dc}{dN} = 2{,}8 \cdot 10^{-11} \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^{0{,}25}} \right)^{2{,}7}. \qquad (А.3)$$

А.2.2 Скорость роста усталостной трещины для ОМ и МШ в коррозионной среде первого контура вычисляют по формулам:

$$\frac{da}{dN}, \frac{dc}{dN} = 2{,}1 \cdot 10^{-17} \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^{0{,}5}} \right)^{7{,}2} \quad \text{при} \quad \frac{\Delta K}{(1-R)^{0{,}5}} < 31{,}8 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}; \qquad (А.4)$$

$$\frac{da}{dN}, \frac{dc}{dN} = 1{,}08 \cdot 10^{-8} \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^{0{,}5}} \right)^{1{,}4} \quad \text{при} \quad \frac{\Delta K}{(1-R)^{0{,}5}} \geq 31{,}8 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}. \qquad (А.5)$$

В формулах (А.1)—(А.5) принимают: если $K_{min}^{цикл} < 0$, то $K_{min}^{цикл} = 0$; если $K_{max}^{цикл} < 0$, то $\Delta K = 0$; если $R < 0$, то $R = 0$; если $R > 0{,}95$, то $R = 0{,}95$.

Формулы (А.1)—(А.5) могут быть использованы при температуре $T \leq 350$ °С и флюенсе нейтронов $F \leq 3{,}0 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$.

## Приложение Б
## (обязательное)

## Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора ВВЭР-440 (В-230, В-179)

### Б.1 Область применения

Б.1.1 Приложение устанавливает правила расчета вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$ ОМ и МШ корпусов ВВЭР-440 (В-179, В-230) (сталь 15Х2МФА и ее сварные соединения), в том числе, прошедших отжиг по режиму с параметрами:

- температура отжига $T_{отж}$ = (475 ± 15) °С;
- продолжительность отжига от 100 до 150 часов.

Б.1.2 Расчет вязкости разрушения проводят для следующих областей КР:

- облучаемая область, прошедшая отжиг;
- облучаемая область, не прошедшая отжиг;
- необлучаемая область.

Примечания

1 Облучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

2 Облучаемая область, прошедшая отжиг — облучаемая область КР, которая в процессе отжига в течение 100 ÷ 150 часов подвергалась нагреву до температуры $T \geq 460$ °С.

3 Облучаемая область, не прошедшая отжиг — облучаемая область КР, которая в процессе отжига подвергалась нагреву до температуры $T < 460$ °С.

4 Необлучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ не превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

5 Зоны КР, для которых температура при отжиге превышает 420 °С, определяют путем решения тепловой задачи. Тепловой расчет выполняют на основании параметров нагревательного устройства и режимов нагрева, приведенных в технологической инструкции на отжиг КР, утвержденной в установленном порядке. Тепловой расчет выполняют с использованием программных средств, аттестованных в установленном порядке.

Б.1.3 Допускается рассматривать в качестве отожженной области облучаемую область ОМ, нагреваемую в процессе отжига до температур 420 °С ≤ $T$ < 460 °С, в случае необходимости снижения консервативности оценки СХР КР.

Примечание — Облучаемая область, прошедшая отжиг в интервале температур 420 °С ≤ $T$ < 460 °С — облучаемая область КР, которая в процессе отжига в течение 100 ÷ 150 часов подвергалась нагреву в интервале температур 420 °С ≤ $T$ < 460 °С. Для этой зоны КР допускается учитывать частичное восстановление свойств.

### Б.2 Определение зависимости вязкости разрушения

Б.2.1 Для ОМ и МШ температурная зависимость вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ , вычисляют по формуле

$$\bar{K}_{JC}(T) = k \cdot \left[ K_{JC}^{shelf} - K_{\min} + \Omega_{расч} \cdot a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T - a_2}{a_3} \right) \right) \right] + K_{\min}, \qquad (Б.1)$$

где $k$ = 0,52;

$K_{JC}^{shelf}$ = 30 МПа · $\sqrt{\text{м}}$ ; $K_{\min}$ = 20 МПа · $\sqrt{\text{м}}$ ; $T$ — температура, °С;

$\Omega_{расч}$ — параметр материала, характеризующий температурную зависимость вязкости разрушения материала в текущем состоянии, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ .

В случае, если $T$ < 130 °С, следует принимать $a_1$ = 1, $a_2$ = 130 °С, $a_3$ =105 °С; если $T \geq 130$ °С — $a_1$ = 1,99, $a_2$ = 216 °С, $a_3$ =157 °С.

Зависимость $\bar{K}_{JC}(T)$ отвечает длине фронта трещины $\bar{B}$ = 25 мм и $P_f$ = 0,05.

Б.2.2 Параметр $\Omega_{расч}$, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ , в формуле (Б.1) вычисляют по формуле

$$\Omega_{расч} = \frac{70}{a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T_{100}^{расч} - a_2}{a_3} \right) \right)}, \qquad (Б.2)$$

где если $T_{100}^{расч} < 130$ °С, то $a_1$ = 1, $a_2$ = 130 °С, $a_3$ = 105 °С;

если $T_{100}^{расч} \geq 130$ °С, то $a_1$ = 1,99, $a_2$ = 216 °С, $a_3$ = 157 °С.

Б.2.3 Для необлучаемых областей КР расчет $T_{100}^{\text{расч}}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{\text{расч}} = T_{100}^{start} + \Delta T_T, \quad (Б.3)$$

где $T_{100}^{start}$ — значение $T_{100}$ для ОМС и МШ в исходном состоянии для не отжигаемых областей, в случае если рассматривают материал после отжига, то вместо $T_{100}^{start}$ используют $T_{100}^{restart}$ — значение $T_{100}$ в момент начала эксплуатации после последнего отжига;

$\Delta T_T$ — сдвиг $T_{100}$, обусловленный термическим старением, за время эксплуатации КР после последнего отжига для отжигаемых областей, или за все время эксплуатации для неотжигаемых областей, °С.

Б.2.4 Для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, и для облучаемых областей КР, прошедших отжиг, $T_{100}^{\text{расч}}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{\text{расч}} = T_{100}^{start} + \Delta T_F + \delta T_к, \quad (Б.4)$$

где $\Delta T_F$ — сдвиг $T_{100}$ вследствие нейтронного облучения за время эксплуатации КР после последнего отжига для отжигаемых областей, или за все время эксплуатации для неотжигаемых областей, °С.

Б.2.5 Сдвиг $\Delta T_F$, °С, в формуле (Б.4) вычисляют по формуле

$$\Delta T_F = A_F \left( \frac{F}{F_0} \right)^n, \quad (Б.5)$$

где $A_F$ — коэффициент радиационного охрупчивания, °С;

$n$ — константа материала;

$F$ — флюенс нейтронов с энергией $E > 0{,}5$ МэВ, 1/м$^2$;

$F_0 = 10^{22}$ 1/м$^2$.

Для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, флюенс нейтронов отсчитывают от начала эксплуатации реактора.

Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг, флюенс нейтронов отсчитывают от начала эксплуатации реактора после проведения последнего отжига.

Значения $T_{100}^{start}$, $\Delta T_T$, $\delta T_к$, $A_F$ и $n$ для расчета $T_{100}^{\text{расч}}$ по формулам (Б.3) и (Б.4) приведены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 — Значение $T_{100}^{start}$, $\Delta T_T$, $\delta T_к$, $A_F$ и $n$ для расчета $T_{100}^{расч}$ по формулам (Б.3) и (Б.4)

| Материал | | $T_{100}^{start}$, °С | $A_F$, °С | $n$ | $\Delta T_T$, °С | $\delta T_к$, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Для необлучаемых областей КР | Основной металл | $T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr-ch}$ | — | — | 20 | — |
| | Металл шва | $\max\left\{T_{к0}^{ТУ}, T_{к0}^{темпл}\right\} - \delta T_{cr-ch}$ | — | — | 20 | — |
| Для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг | Основной металл: $C_P \le 0{,}027$ и $C_{Cu} \le 0{,}24$ | $T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr-ch}$ | $2{,}8 + 358(C_P - 0{,}005) + 16{,}5(C_{Cu} - 0{,}06)$ | 0,483 | — | 22 |
| | Металл шва: $C_P \le 0{,}032$ и $C_{Cu} \le 0{,}11$ | $\max\left\{T_{к0}^{ТУ}, T_{к0}^{темпл}\right\} - \delta T_{cr-ch}$ | $6{,}4 + 610(C_P - 0{,}005) + 43(C_{Cu} - 0{,}06)$ | 1/3 | — | 20 |
| | Металл шва: $0{,}032 < C_P \le 0{,}054$ или $0{,}11 < C_{Cu} \le 0{,}23$ | $\max\left\{T_{к0}^{ТУ}, T_{к0}^{темпл}\right\} - \delta T_{cr-ch}$ | $6{,}4 + 610(C_P - 0{,}005) + 43(C_{Cu} - 0{,}06)$ | 1/3 | — | 40 |
| Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг при 420 °С ≤ $T$ < 460 °С | Основной металл: $0{,}012 \le C_P \le 0{,}016$ и $C_{Cu} \le 0{,}23$ | $T_{кВ420} - \delta T_{cr-ch}$ | $0{,}92 \cdot \exp(1 - 0{,}0157 \cdot T_{кВ})$ | 0,6 | — | 30 |
| Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг | Основной металл: $0{,}012 \le C_P \le 0{,}016$ и $C_{Cu} \le 0{,}23$ | $T_{кВ} - \delta T_{cr-ch}$ | $0{,}92 \cdot \exp(1 - 0{,}0157 \cdot T_{кВ})$ | 0,6 | — | 30 |
| | Металл шва $0{,}02 < C_P \le 0{,}050$ и $C_{Cu} \le 0{,}24$ | $T_{кВ} - \delta T_{cr-ch}$ | $646(C_P - 0{,}02) \cdot \exp(1 - 0{,}01 \cdot T_{кВ})$ | 0,36 | — | 35 |

Примечания

1 Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг, под $T_{100}^{start}$ понимают $T_{100}^{restart}$.

2 $C_P$, $C_{Cu}$ — содержание фосфора и меди в весовых % соответственно.

3 Для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, при расчете $A_F$ следует принимать $C_P = 0{,}005$, если $C_P < 0{,}005$, и $C_{Cu} = 0{,}06$, если $C_{Cu} < 0{,}06$.

4 Для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, параметры и зависимости таблицы могут быть использованы:

- для ОМ — при $F \le 3{,}0 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$ и $T_{обл} = 270$ °С;
- для МШ — при $F \le 0{,}6 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$ и $T_{обл} = 270$ °С.

5 Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг, параметры и зависимости таблицы могут быть использованы:

- для ОМ — при $0{,}012 \le C_P \le 0{,}016$ и $C_{Cu} \le 0{,}23$, при $F \le 1{,}6 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$ и $T_{обл} = 270$ °С;
- для МШ — при $0{,}02 < C_P < 0{,}034$ и $C_{Cu} \le 0{,}24$, $F \le 1{,}6 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$ и $T_{обл} = 270$ °С, при $0{,}034 \le C_P \le 0{,}05$ и $C_{Cu} \le 0{,}24$, $F \le 0{,}6 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$ и $T_{обл} = 270$ °С.

6 $T_{к0}^{ТУ}$ — значение $T_{к0}$, которое приведено в приложении У.

7 $T_{к0}^{темпл}$ — значение $T_{к0}$, которое определяют в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12 по результатам испытаний образцов, изготовленных из темплетов, вырезанных из КР, °С.

8 $T_{кВ420}$ — значение $T_к$ после отжига в диапазоне температур 420 °С ≤ $T$ < 460 °С, которое определяют в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12 по результатам испытаний образцов, изготовленных из темплетов, вырезанных из внутренней поверхности облучаемой обечайки из зоны КР, нагреваемой в процессе отжига до температуры 420—460 °С. При отсутствии результатов испытания образцов из темплетов, допускается принимать $T_{кВ420} = 45$ °С.

9 $T_{кВ}$ — значение $T_к$ после отжига, которое определяют в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12 по результатам испытаний образцов, изготовленных из темплетов, вырезанных из КР, °С. Допускается определять $T_{кВ}$ для элемента КР с использованием отжига в лабораторных условиях темплетов, вырезанных из КР до отжига или после облучения после отжига в составе КР. Лабораторный отжиг проводится при температуре (475 ± 5) °С в течение 150 часов.

10 $\delta T_{cr-ch}$ — разность между $T_к$ и $T_{100}$, в общем случае зависящая от материала; для ОМ и МШ корпуса ВВЭР-440 (В-230, В-179) $\delta T_{cr-ch} = 38$ °С.

## Приложение В
## (обязательное)

## Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора ВВЭР-440 (В-213)

### В.1 Область применения

В.1.1 Приложение устанавливает правила расчета вязкости разрушения ОМ и МШ КР ВВЭР-440 (В-213) (сталь 15Х2МФА-А и ее сварные соединения).

В.1.2 Приложение не распространяется на ОМ и МШ корпуса ВВЭР-440 (В-213) прошедших отжиг.

В.1.3 Расчет вязкости разрушения проводят для следующих областей КР:

- облучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$;
- необлучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ не превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

### В.2 Определение зависимости вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$

В.2.1 Для ОМ и МШ температурная зависимость вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$, вычисляют по формуле

$$\bar{K}_{JC}(T) = k \cdot \left[ K_{JC}^{shelf} - K_{\min} + \Omega_{\text{расч}} \cdot a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T - a_2}{a_3} \right) \right) \right] + K_{\min}, \quad \text{(В.1)}$$

где $k = 0{,}52$;

$K_{JC}^{shelf} = 30$ МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ ; $K_{\min} = 20$ МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ ; $T$ — температура, °С;

если $T < 130$ °С, то $a_1 = 1$, $a_2 = 130$ °С, $a_3 = 105$ °С;

если $T \geq 130$ °С, то $a_1 = 1{,}99$, $a_2 = 216$ °С, $a_3 = 157$ °С;

$\Omega_{\text{расч}}$ — параметр материала, характеризующий температурную зависимость вязкости разрушения материала в текущем состоянии, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ .

Зависимость $\bar{K}_{JC}(T)$ отвечает длине фронта трещины $\bar{B} = 25$ мм и $P_f = 0{,}05$.

В.2.2 Параметр $\Omega_{\text{расч}}$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ , в формуле (В.1) вычисляют по формуле

$$\Omega_{\text{расч}} = \frac{70}{a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T_{100}^{\text{расч}} - a_2}{a_3} \right) \right)}, \quad \text{(В.2)}$$

где если $T_{100}^{\text{расч}} < 130$ °С, то $a_1 = 1$, $a_2 = 130$ °С, $a_3 = 105$ °С;

если $T_{100}^{\text{расч}} \geq 130$ °С, то $a_1 = 1{,}99$, $a_2 = 216$ °С, $a_3 = 157$ °С.

В.2.3 В формуле (В.2) $T_{100}^{\text{расч}}$ вычисляют по формуле

- для необлучаемых областей КР

$$T_{100}^{\text{расч}} = T_{100}^{start} + \Delta T_T, \text{°С}; \quad \text{(В.3а)}$$

- для облучаемых областей КР

$$T_{100}^{\text{расч}} = T_{100}^{start} + \Delta T_F + \delta T_{\text{к}}, \text{ °С}, \quad \text{(В.3б)}$$

где $T_{100}^{start}$ — значение $T_{100}$ для ОМ и МШ в исходном состоянии;

$\Delta T_F$ — сдвиг $T_{100}$ вследствие нейтронного облучения за время от начала эксплуатации;

$\Delta T_T$ — сдвиг $T_{100}$, обусловленный термическим старением за время эксплуатации КР;

$\delta T_{\text{к}}$ — температурный запас на погрешность прогнозирования $\Delta T_{100}$ в дозо-временных зависимостях, °С.

### В.3 Определение температуры $T_{100}^{start}$

В.3.1 Для необлучаемых областей КР $T_{100}^{start}$ вычисляют по формуле

$$T_{100}^{start} = T_{\text{к}0}^{\text{ТУ}} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \text{ °С}, \quad \text{(В.4)}$$

где $T_{\text{к}0}^{\text{ТУ}}$ — значение $T_{\text{к}0}$, приведенное в ТУ на материал, действовавших на момент изготовления данного КР, °С; значение $T_{\text{к}0}^{\text{ТУ}}$ допускается определять согласно приложению У.

В.3.2 Для облучаемых областей КР расчет $T_{100}^{start}$ вычисляют по различным формулам для рассмотренных ниже случаев.

В.3.2.1 В случае, если данные испытаний ОС для исходного состояния для рассматриваемого материала отсутствуют, $T_{100}^{start}$, °С, вычисляют по формулам:

- для ОМ

$$T_{100}^{start} = T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}; \quad (В.5а)$$

- для МШ

$$T_{100}^{start} = \begin{cases} T_{к0}^{pas} - \delta T_{cr\text{-}ch} + \delta T_{NH}, \text{ если } T_{к0}^{ТУ} > T_{к0}^{pas} + \delta T_{NH} \\ T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \text{ если } T_{к0}^{ТУ} \le T_{к0}^{pas} + \delta T_{NH} \end{cases}, \quad (В.5б)$$

где $T_{к0}^{ТУ}$ — критическая температура хрупкости согласно ТУ на материал, °С; значение $T_{к0}^{ТУ}$ допускается определять согласно приложению У;

$T_{к0}^{pas}$ — значение критической температуры хрупкости для материала рассматриваемого элемента согласно паспорту на КР, °С;

$\delta T_{cr\text{-}ch}$ — разность между $T_к$ и $T_{100}$, в общем случае зависящая от материала, °С;

$\delta T_{NH}$ — запас на пространственную неоднородность свойств материала, °С.

Для ОМ и МШ корпуса ВВЭР-440 (В-213) $\delta T_{cr\text{-}ch}$ = 38 °С, $\delta T_{NH}$ = 26 °С.

В.3.2.2 В случае, если данные испытаний ОС для исходного состояния имеются в наличии для рассматриваемого материала, $T_{100}^{start}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{start} = \begin{cases} T_{100}^{max}, \text{ если } T_{100}^{max} \le T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \\ T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \text{ если } T_{100}^{max} > T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \end{cases}. \quad (В.6)$$

В формуле (В.6) $T_{100}^{max}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{max} = \max\left[\left(T_{к0}^{ОС} - \delta T_{cr\text{-}ch} + \delta T_{NH}\right), \left(T_{100}^{\Omega 0} + \delta T_{NH} + \delta T_{type}\right)\right], \quad (В.7)$$

где $T_{к0}^{ОС}$ — значение критической температуры хрупкости для материала в исходном состоянии, определенное на контрольном комплекте ОС на ударный изгиб, °С;

$T_{100}^{\Omega 0}$ — значение $T_{100}$ для материала в исходном состоянии, определенное на контрольном комплекте ОС на вязкость разрушения, °С; расчет $T_{100}^{\Omega 0}$ выполняют в соответствии с приложением Е;

$\delta T_{type}$ — запас на тип образца для образцов типа СТ и SE(B)-10 по ГОСТ Р 50.05.12:

$$\delta T_{type} = \begin{cases} 0\ °С - \text{для образцов типа СТ и SE(B)-10 с глубокими боковыми} \\ \text{канавками (суммарно 50 \% от толщины образца)} \\ 15\ °С - \text{для образцов типа SE(B)-10 без боковых канавок или} \\ \text{со стандартными боковыми канавками (суммарно 20 \%} \\ \text{от толщины образца)} \end{cases}. \quad (В.8)$$

Допускается использовать формулу (В.6) для случаев, когда имеются только данные испытаний на ударный изгиб или на вязкость разрушения.

Предпочтительно определять $T_{100}^{start}$ на основании результатов испытаний ОС на вязкость разрушения.

### В.4 Определение $\Delta T_T$

В.4.1 Для необлучаемых областей КР значение $\Delta T_T$ в формуле (В.3а) принимают в соответствии с таблицей В.1.

### В.5 Определение $\Delta T_F$, $A_F$ и $\delta T_к$ по аналитическим формулам

В.5.1 Для облучаемых областей КР $\Delta T_F$, °С, вычисляют по формуле

$$\Delta T_F = A_F \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^n, \quad (В.9)$$

где $A_F$ — коэффициент радиационного охрупчивания, °С;

$n$ — константа материала;

$F$ — флюенс нейтронов с энергией $E$ > 0,5 МэВ, 1/м$^2$; отсчитываемый от начала эксплуатации реактора;

$$F_0 = 10^{22}\ 1/м^2.$$

Значения $A_F$ и $n$ в формуле (В.9) принимают по таблице В.1.

В.5.2 Для облучаемых областей КР значение $\delta T_к$ в формуле (В.3б) принимают в соответствии с таблицей В.1.

Таблица В.1 — Значения $\Delta T_T$, $\delta T_к$ и коэффициентов $A_F$, $n$

| Материал | | $\Delta T_T$, °С | $A_F$, °С | $n$ | $\delta T_к$, °С |
|---|---|---|---|---|---|
| Для необлучаемых областей КР | Основной металл | 20 | — | — | — |
| | Металл шва | 20 | — | — | — |
| Для облучаемых областей КР | Основной металл: $C_P \le 0{,}013$, $C_{Cu} \le 0{,}11$ | — | $2{,}8 + 358(C_P - 0{,}005) + 16{,}5(C_{Cu} - 0{,}06)$ | 0,483 | 22 |
| | Металл шва: $C_P \le 0{,}032$, $C_{Cu} \le 0{,}11$ | — | $6{,}4 + 610(C_P - 0{,}005) + 43(C_{Cu} - 0{,}06)$ | 1/3 | 20 |

Примечания

1 $C_P$, $C_{Cu}$ — содержание фосфора и меди в весовых % соответственно.

2 При расчете $A_F$ принимать $C_P = 0{,}005$, если $C_P < 0{,}005$.

3 При расчете $A_F$ принимать $C_{Cu} = 0{,}06$, если $C_{Cu} < 0{,}06$.

4 Параметры и зависимости в таблице могут быть использованы для ОМ и МШ при $F \le 3{,}0 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$ и $T_{обл} = 270$ °С.

### В.6 Определение $\Delta T_F$, $A_F$ и $\delta T_к$ по результатам испытаний образцов свидетелей

В.6.1 Положения настоящего подраздела распространяются на ОМ и МШ облучаемых областей КР.

В.6.2 Для определения $A_F$ по результатам испытаний ОС в облученном состоянии должно быть испытанно не менее шести серий образцов, облученных до разных значений флюенса нейтронов. Флюенс нейтронов для любого образца, принадлежащего к одной серии, не должен отличаться более чем на 10 % от среднего значения для этой группы. Для одной серии образцов целесообразно испытывать не менее 12 ОС.

В.6.3 Алгоритм определения параметра $A_F$.

В.6.3.1 Для ОС, испытанных на ударный изгиб, формируют таблицу экспериментальных значений $\Delta T^j_{к\ exp}$, отвечающих величине флюенса нейтронов $F_j$ и времени облучения $t_j$, где $j$ — номер серии образцов ($j = 1,\ldots, L$, $L$ — количество серий образцов испытанных на ударный изгиб).

В.6.3.2 Для ОС испытанных на вязкость разрушения формируют таблицу экспериментальных значений $\Delta T^i_{100\ exp}$, отвечающих величине флюенса нейтронов $F_i$ и времени облучения $t_i$, где $i$ — номер серии образцов ($i = 1,\ldots, M$, $M$ — количество серий образцов, испытанных на вязкость разрушения).

Принимается, что $\Delta T^i_F = \Delta T^j_{к\ exp}$, а $\Delta T^i_F = \Delta T^i_{100\ exp}$.

В.6.3.3 Пары значений $\Delta T^j_F$, $F_j$ и $\Delta T^i_F$, $F_i$ объединяют в один массив и аппроксимируют уравнением вида (В.9), где $A_F$ определяют методом наименьших квадратов, а параметр $n$ определяют по таблице В.1.

В.6.3.4 Дисперсия $S^2$, обусловленная пространственной неоднородностью материала для определенного значения $A_F$, вычисляют по формуле

$$S^2 = \frac{1}{L+M-1}\left(\sum_{j=1}^{L}(\Delta T_F(F_j) - \Delta T_F^j)^2 + \sum_{i=1}^{M}(\Delta T_F(F_i) - \Delta T_F^i)^2\right), \quad (В.10)$$

где $L$ — количество серий образцов, испытанных на ударный изгиб;

$\Delta T_F(F_j)$ — значение $\Delta T_F$, полученные по формуле (В.9) при $F = F_j$;

$M$ — количество серий образцов, испытанных на вязкость разрушения;

$\Delta T_F(F_i)$ — значение $\Delta T_F$, полученные по формуле (В.9) при $F = F_i$.

В.6.3.5 Определения $\delta T_к$.

Значение $\delta T_к$, °С, вычисляют по формуле

$$\delta T_к = \begin{cases} 0, & \text{если } S^2 \le \sigma_{ОС}^2 \\ \sqrt{(S \cdot t_{0,05})^2 (1 + 1/L) - (2\sigma_{ОС})^2}, & \text{если } S > \sigma_{ОС} \end{cases}, \quad (В.11)$$

где $\sigma_{ОС}$ — стандартное отклонение $T_к$, разброс значений которого связан с пространственной неоднородностью ОС, $\sigma_{ОС} = 7{,}5$ °С;

$t_{0,05}$ — значение квантили распределения Стьюдента для уровня вероятности $P$, равном 0,975 ($P = 1 - 0{,}05/2$), и для числа степеней свободы $k = L + M - 1$.

В случае, если определенное по формуле (В.11) значение $\delta T_к$ больше чем значение $\delta T_к$, приведенное в таблице В.1, используют значение $\delta T_к$, приведенное в таблице В.1.

**Приложение Г**
**(обязательное)**

## Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора ВВЭР-1000

### Г.1 Область применения

Г.1.1 Приложение устанавливает правила расчета вязкости разрушения ОМ и МШ корпуса ВВЭР-1000 (сталь 15Х2НМФА, сталь 15Х2НМФА-А и их сварные соединения), в том числе, прошедших отжиг по режиму с параметрами:

- температура отжига $T_{отж}$ = (565 ± 15) °С;
- продолжительность от 100 до 150 часов.

Г.1.2 Расчет вязкости разрушения проводят для следующих областей КР:

- облучаемая область, прошедшая отжиг;
- облучаемая область, не прошедшая отжиг;
- необлучаемая область.

Примечания

1 Облучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

2 Облучаемая область, прошедшая отжиг — облучаемая область КР, которая в процессе отжига в течение 100 ÷ 150 часов подвергалась нагреву с $T \geq 550$ °С.

3 Облучаемая область, не прошедшая отжиг — облучаемая область КР, которая в процессе отжига подвергалась нагреву до $T < 550$ °С.

4 Необлучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ не превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

### Г.2 Определение зависимости вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$

Г.2.1 Для ОМ и МШ температурная зависимость вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ , вычисляют по формуле

$$\bar{K}_{JC}(T) = k \cdot \left[ K_{JC}^{shelf} - K_{\min} + \Omega_{расч} \cdot a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T - a_2}{a_3} \right) \right) \right] + K_{\min}, \quad (Г.1)$$

где $k$ = 0,52;

$K_{JC}^{shelf}$ = 30 МПа · $\sqrt{\text{м}}$ ; $K_{\min}$ = 20 МПа · $\sqrt{\text{м}}$ ; $T$ — температура, °С;

если $T < 130$ °С, то $a_1$ = 1, $a_2$ = 130 °С, $a_3$ = 105 °С;

если $T \geq 130$ °С, то $a_1$ = 1,99, $a_2$ = 216 °С, $a_3$ = 157 °С;

$\Omega_{расч}$ — параметр материала, характеризующий температурную зависимость вязкости разрушения материала в текущем состоянии, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ .

Зависимость $\bar{K}_{JC}(T)$ отвечает длине фронта трещины $\bar{B}$ = 25 мм и $P_f$ = 0,05.

Г.2.2 Параметр $\Omega_{расч}$, МПа · $\sqrt{\text{м}}$ , в формуле (Г.1) вычисляют по формуле

$$\Omega_{расч} = \frac{70}{a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T_{100}^{расч} - a_2}{a_3} \right) \right)}, \quad (Г.2)$$

где если $T_{100}^{расч} < 130$ °С, то $a_1$ = 1, $a_2$ = 130 °С, $a_3$ = 105 °С;

если $T_{100}^{расч} \geq 130$ °С, то $a_1$ = 1,99, $a_2$ = 216 °С, $a_3$ = 157 °С.

Г.2.3 В формуле (Г.2) $T_{100}^{расч}$ , °С, вычисляют по формулам:

- для необлучаемых областей КР

$$T_{100}^{расч} = T_{100}^{start} + \Delta T_T; \quad (Г.3а)$$

- для облучаемых областей КР

$$T_{100}^{расч} = T_{100}^{start} + \Delta T_F + \Delta T_T + \delta T_к, \quad (Г.3б)$$

где $T_{100}^{start}$ — значение $T_{100}$ для ОМ и МШ в исходном состоянии для не отжигаемых областей, °С; в случае если рассматривают материал после отжига, то вместо $T_{100}^{start}$ используют $T_{100}^{restart}$ ;

$T_{100}^{restart}$ — значение $T_{100}$ в момент начала эксплуатации после последнего отжига, °С;

$\Delta T_F$ — сдвиг $T_{100}$ вследствие нейтронного облучения за время эксплуатации КР до отжига для не отжигаемых областей или за время эксплуатации после последнего отжига для отжигаемых областей, °С;

$\Delta T_T$ — сдвиг $T_{100}$, обусловленный термическим старением, за время эксплуатации КР до отжига для не отжигаемых областей или за время эксплуатации КР после последнего отжига для отжигаемых областей, °С;

$\delta T_к$ — температурный запас на погрешность прогнозирования $\Delta T_{100}$ в дозо-временных зависимостях, °С.

### Г.3 Определение температуры $T_{100}^{start}$

Г.3.1 Для необлучаемых областей КР и облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, $T_{100}^{start}$ вычисляют по представленным ниже формулам.

Г.3.1.1 В случае, если материал рассматриваемого элемента КР не представлен в Программе ОС и для него нет[1)] архивного металла, $T_{100}^{start}$, °С, вычисляют по формулам:

- для ОМ

$$T_{100}^{start} = T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}; \quad (Г.4а)$$

- для МШ

$$T_{100}^{start} = \begin{cases} T_{к0}^{pas} - \delta T_{cr\text{-}ch} + \delta T_{NH}, \text{ если } T_{к0}^{ТУ} > T_{к0}^{pas} + \delta T_{NH} \\ T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \text{ если } T_{к0}^{ТУ} \le T_{к0}^{pas} + \delta T_{NH} \end{cases}, \quad (Г.4б)$$

где $T_{к0}^{ТУ}$ — критическая температура хрупкости согласно ТУ на материал, действующим на момент изготовления КР, °С; значение $T_{к0}^{ТУ}$ допускается определять согласно приложению У;

$T_{к0}^{pas}$ — значение критической температуры хрупкости для материала, рассматриваемого сварного соединения, согласно паспорту на КР;

$\delta T_{cr\text{-}ch}$ — разность между $T_к$ и $T_{100}$, в общем случае, зависящая от материала; значение $\delta T_{cr\text{-}ch}$ определяют в соответствии с таблицей Г.1;

$\delta T_{NH}$ — запас на пространственную неоднородность свойств материала; для материалов корпуса ВВЭР-1000 $\delta T_{NH}$ = 26 °С.

Таблица Г.1 — Значение $\delta T_{cr\text{-}ch}$

| Вид материала | $\delta T_{cr\text{-}ch}$, °С |
|---|---|
| Основной металл 15Х2НМФА класс 1,15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А | 38 |
| Металл шва А, В | 38 |
| Металл шва Б | 23 |
| Примечания<br>1 Металл шва А — металл шва с содержанием никеля $1{,}3 < C_{Ni} \le 1{,}9$ %.<br>2 Металл шва Б — металл шва с содержанием никеля $C_{Ni} \le 1{,}3$ %, кроме металла шва изготовленного с использованием сварочной проволоки Св-10ХГНМАА.<br>3 Металл шва В — металл с содержанием никеля $C_{Ni} \le 1{,}3$ %, изготовленный с использованием сварочной проволоки Св-10ХГНМАА. | |

Г.3.1.2 В случае, если МШ КР представлен в Программе ОС, но для него нет расширенного дополнительного (контрольного) комплекта и архивного металла, а также, если ОМ рассматриваемого элемента представлен только в ОМ из ОС, предусмотренных для исследования ЗТВ, $T_{100}^{start}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{start} = \begin{cases} T_{100}^{max}, \text{ если } T_{100}^{max} \le T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \\ T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \text{ если } T_{100}^{max} > T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \end{cases}. \quad (Г.5)$$

В формуле (Г.5) $T_{100}^{max}$ вычисляют по формуле

[1)] Здесь и далее под наличием металла подразумевается объем металла, необходимый для корректного определения значения требуемой характеристики.

$$T_{100}^{\max} = \max\left[\left(T_{к0}^{ОС} - \delta T_{cr\text{-}ch} + \delta T_{NH}\right), \left(T_{100}^{\Omega 0} + \delta T_{NH} + \delta T_{type}\right)\right], \quad (Г.6)$$

где $T_{к0}^{ОС}$ — значение критической температуры хрупкости для материала рассматриваемого элемента в исходном состоянии, определенное на контрольном комплекте МШ ОС или на ОМ из ОС, предусмотренных для исследования ЗТВ;

$T_{100}^{\Omega 0}$ — значение $T_{100}$ для материала рассматриваемого элемента КР в исходном состоянии, определенное на контрольном комплекте МШ ОС или на ОМ из ОС, предусмотренных для исследования ЗТВ, в том числе с применением технологии реконструкции образцов в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12—2018 (приложение Ж); определение $T_{100}^{\Omega 0}$ проводят в соответствии с приложением Е;

$\delta T_{type}$ — запас на тип образца для образцов типа CT и SE(B)-10 по ГОСТ Р 50.05.12:

$$\delta T_{type} = \begin{cases} 0\ °C & \text{– для образцов типа CT и SE(B)-10 с глубокими боковыми} \\ & \text{канавками (суммарно 50 % от толщины образца)} \\ 15\ °C & \text{– для образцов типа SE(B)-10 без боковых канавок или} \\ & \text{со стандартными боковыми канавками (суммарно 20 %} \\ & \text{от толщины образца)} \end{cases}.$$

Г.3.1.3 В случае, если металл представлен в расширенном дополнительном (контрольном) комплекте, или в наличии для него имеется архивный металл, $T_{100}^{start}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{start} = \begin{cases} T_{100}^{\max}, \text{ если } T_{100}^{\max} \le T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \\ T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \text{ если } T_{100}^{\max} > T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \end{cases}. \quad (Г.7)$$

В формуле (Г.7) $T_{100}^{\max}$ вычисляют по формуле

$$T_{100}^{\max} = \max\left\{T_{ки} - \delta T_{cr\text{-}ch};\ T_{100}^{\Omega 0} + \delta_{ки} + \delta T_{type}\right\}, \quad (Г.8)$$

где $T_{ки}$ — консервативная оценка значения критической температуры хрупкости, определенная по результатам испытаний образцов расширенного дополнительного (контрольного) комплекта или архивного металла в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12—2018 (приложение Б);

$\delta_{ки}$ — параметр, характеризующий пространственную неоднородность свойств металла элемента КР, определяемый по результатам испытаний образцов расширенного дополнительного (контрольного) комплекта или архивного металла в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12—2018 (приложение Б).

Для упрощенной, консервативной оценки $T_{100}^{\max}$ допускается использовать формулу (Г.6) вместо формулы (Г.8), при этом $T_{к0}^{ОС}$ определяют по результатам испытаний дополнительного (контрольного) комплекта ОС.

Г.3.2 Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг, $T_{100}^{restart}$ вычисляют по различным формулам для рассмотренных ниже случаев.

Г.3.2.1 В случае, если данные по испытаниям ОС для рассматриваемого материала, прошедшего отжиг, отсутствуют, $T_{100}^{restart}$, °С, вычисляют по формулам:

- для ОМ

$$T_{100}^{restart} = T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr-ch} + \delta T_{res}^{\max}; \quad (Г.9)$$

- для МШ

$$T_{100}^{restart} = \left(T_{к0}^{ОС}\right)^{\max} - \delta T_{cr-ch} + \sqrt{\left(\delta T_{NH}\right)^2 + \left(\delta T_{res}^{\max}\right)^2}, \quad (Г.10)$$

где $T_{100}^{restart}$ — значение $T_{100}$ в момент начала эксплуатации после последнего отжига;

$\delta T_{res}^{\max}$ — максимальный запас на неполное восстановление критической температуры хрупкости после отжига; допускается принимать $\delta T_{res}^{\max} = 24$ °С;

$\left(T_{к0}^{ОС}\right)^{\max}$ — наибольшее значение критической температуры хрупкости для МШ, полученное на базе испытаний всех имеющихся контрольных комплектов ОС облучаемых элементов корпуса ВВЭР-1000; для МШ (проволока Св-10ХГНМАА): $\left(T_{к0}^{ОС}\right)^{\max} = -34$ °С.

Г.3.2.2 В случае, если для материала, прошедшего отжиг, имеются в наличии данные по испытаниям ОС, $T_{100}^{restart}$, °С, вычисляют по формулам:

- для ОМ

$$T_{100}^{restart} = \max\left[\begin{array}{l}\left(T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} + \delta T_{к}^{res}\right),\\ \left(T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} + \delta T_{100}^{res}\right)\end{array}\right]; \quad (Г.11а)$$

- для МШ

$$T_{100}^{restart} = \max\left[\begin{array}{l}\left(T_{к0}^{ОС} - \delta T_{cr\text{-}ch} + \sqrt{\left(\delta T_{NH}\right)^2 + \left(\delta T_{к}^{res}\right)^2}\right),\\ \left(T_{100}^{\Omega 0} + \delta T_{type} + \sqrt{\left(\delta T_{NH}\right)^2 + \left(\delta T_{100}^{res}\right)^2}\right)\end{array}\right], \quad (Г.11б)$$

где $\delta T_{к}^{res}$ — остаточный сдвиг критической температуры хрупкости, обусловленный неполным восстановлением свойств после отжига;

$\delta T_{100}^{res}$ — остаточный сдвиг $T_{100}$, обусловленный неполным восстановлением свойств после отжига.

В формуле (Г.11) $\delta T_{к}^{res}$, °С, вычисляют по формуле

$$\delta T_{к}^{res} = T_{к}^{an} - T_{к0}^{ОС}, \quad (Г.12)$$

где $\delta T_{к}^{an}$ — значение критической температуры хрупкости, полученное на облученных образцах после их отжига.

В формуле (Г.11) $\delta T_{100}^{res}$, °С, вычисляют по формуле

$$\delta T_{100}^{res} = T_{100}^{an} - T_{100}^{\Omega 0}, \quad (Г.13)$$

где $T_{100}^{an}$ — значение $T_{100}$, полученное на облученных образцах после их отжига.

Расчет $T_{100}^{\Omega 0}$ проводят в соответствии с приложением Е на базе данных испытаний ОС для материала прошедшего отжиг.

Допускается использовать формулу (Г.11) для случаев, когда имеются только данные испытаний на ударный изгиб или на вязкость разрушения.

Значения $T_{к}^{an}$ и $T_{100}^{an}$ определяют по результатам испытаний облученных образцов свидетелей на ударный изгиб или вязкость разрушения после выполнения их отжига по режиму (565 ± 15) °С в течение 100 часов. Для отжига должны быть отобраны образцы, у которых средний флюенс быстрых нейтронов был не менее $0{,}8 \cdot F_{max}$ ($F_{max}$ — максимальный флюенс, накопленный на МШ к моменту проведения отжига).

### Г.4 Определение $\Delta T_T$ по аналитическим формулам

Г.4.1 Для необлучаемых областей КР значение $\Delta T_T$ в формуле (Г.3а) принимают в соответствии с таблицей Г.2.

Г.4.2 Для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, $\Delta T_T$, °С в формуле (Г.3б) вычисляют по формуле

$$\Delta T_T = \left(\Delta T_t^{inf} + b_T \exp\left(\frac{t_T - t}{t_{OT}}\right)\right) \cdot \mathrm{th}\left(\frac{t}{t_{OT}}\right), \quad (Г.14)$$

где $\Delta T_t^{inf}$ — сдвиг критической температуры хрупкости при $t = \infty$;

$t_{OT}$, $t_T$ и $b_T$ — константы материала, зависящие от температуры старения;

$t$ — время эксплуатации КР, ч.

Значения параметров $t_{OT}$, $t_T$, $b_T$ и $\Delta T_t^{inf}$ в формуле (Г.14) принимают по таблице Г.3.

Таблица Г.2 — Значение $\Delta T_T$, $\delta T_к$ и коэффициентов $A_F$ и $n$

| Материал | | $\Delta T_T$, °С | $A_F$, °С | $n$ | $\delta T_к$, °С |
|---|---|---|---|---|---|
| Для необлучаемых областей КР | Основной металл | 30 | — | — | — |
| | Металл шва | 30 | — | — | — |
| Для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг | Основной металл | См. формулу (Г.14) | См. формулу (Г.16) | 0,8 | 38 |
| | Металл шва | См. формулу (Г.14) | См. формулу (Г.17) | 0,8 | 20 |

*Окончание таблицы Г.2*

| Материал | | $\Delta T_T$, °С | $A_F$, °С | $n$ | $\delta T_к$, °С |
|---|---|---|---|---|---|
| Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг | Основной металл | См. формулу (Г.14) | См. формулу (Г.16) | 0,8 | 38 |
| | Металл шва | См. формулу (Г.14) | См. формулу (Г.17) | 0,8 | 20 |

Таблица Г.3 — Значения параметров $t_{OT}$, $t_T$, $b_T$ и $\Delta T_t^{inf}$ в формуле (Г.14)

| Материал | $b_T$, °С | $t_{OT}$, ч | $t_T$, ч | $\Delta T_t^{inf}$, °С |
|---|---|---|---|---|
| Основной металл | 26,2 | 32700 | 40700 | 2 |
| Металл шва с содержанием никеля ≤ 1,3 % | 26,2 | 32700 | 40700 | 2 |
| Металл шва с содержанием никеля > 1,3 % | 10,1 | 23200 | 40900 | 18 |

Г.4.3 Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг, $\Delta T_T$ в формуле (Г.3б) вычисляют по формуле (Г.14), в которой значения параметров $t_{OT}$, $t_T$, $b_T$ и $\Delta T_t^{inf}$ принимают по таблице Г.3.

При расчете $\Delta T_T$ по формуле (Г.14) под временем $t$ понимают время, отсчитываемое от момента начала эксплуатации КР после отжига.

### Г.5 Определение $\Delta T_F$, $A_F$ и $\delta T_к$ по аналитическим формулам

Г.5.1 Для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, $\Delta T_F$ в формуле (Г.3) в соответствии с таблицей Г.2 вычисляют по формуле

$$\Delta T_F = A_F \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^n, \qquad (Г.15)$$

где $A_F$ — коэффициент радиационного охрупчивания, °С;

$n$ — константа материала;

$F$ — флюенс нейтронов с энергией $E$ > 0,5 МэВ, 1/м$^2$; отсчитываемый от начала эксплуатации реактора;

$F_0 = 10^{22}$ 1/м$^2$.

Значение $n$ принимают по таблице Г.2.

Значение $A_F$, °С, вычисляют по формулам:

- для ОМ

$$A_F = 1{,}45 \text{ °С}; \qquad (Г.16)$$

- для МШ

$$A_F = \alpha_1 \exp(\alpha_2 \cdot C_{экв}), \qquad (Г.17)$$

где $C_{экв} = \begin{cases} C_{Ni} + C_{Mn} - \alpha_3 C_{Si}, & \text{если } C_{Ni} + C_{Mn} - \alpha_3 C_{Si} \geq 0 \\ 0, & \text{если } C_{Ni} + C_{Mn} - \alpha_3 C_{Si} < 0 \end{cases}$;

$\alpha_1 = 0{,}703$, $\alpha_2 = 0{,}883$, $\alpha_3 = 3{,}885$;

$C_{Ni}$, $C_{Mn}$, $C_{Si}$ — массовые доли содержания никеля, марганца и кремния в процентах.

Формула (Г.17) может быть использована при следующих значениях массовых долей содержания никеля, марганца и кремния никеля, марганца и кремния:

$$1{,}00\ \% \leq C_{Ni} \leq 1{,}90\ \%;$$

$$0{,}40\ \% \leq C_{Mn} \leq 1{,}10\ \%;$$

$$0{,}20\ \% \leq C_{Si} \leq 0{,}40\ \%.$$

Формулы (Г.16) и (Г.17) могут быть использованы при $F \leq 6{,}4 \cdot 10^{23}$ 1/м$^2$.

Г.5.2 Для облучаемых областей КР, прошедших отжиг, $\Delta T_F$ в формуле (Г.3б) вычисляют по формуле (Г.15), в которой $A_F$ вычисляют по формулам (Г.16) и (Г.17). При этом под $F$ в формуле (Г.15) понимают флюенс нейтронов с энергией $E$ > 0,5 МэВ, 1/м$^2$; отсчитываемый от начала эксплуатации реактора после проведения последнего отжига.

Г.5.3 Значение $\delta T_к$ в формуле (Г.3б) для облучаемых областей КР, прошедших и не прошедших отжиг, принимают по таблице Г.2.

### Г.6 Определение $\Delta T_F$, $\Delta T_T$ и $\delta T_к$ по результатам испытаний образцов свидетелей

Г.6.1 Настоящий подраздел распространяется на МШ облучаемых областей КР не прошедших отжиг.

Г.6.2 Для определения $\Delta T_T$, $A_F$ и $\delta T_к$ по результатам испытаний ОС в облученном состоянии должно быть испытано не менее шести серий образцов, облученных до разных значений флюенса нейтронов. Флюенс нейтронов

для любого образца, принадлежащего к одной серии, не должен отличаться более чем на 10 % от среднего значения для этой группы. Для одной серии образцов целесообразно испытывать не менее 12 ОС.

Г.6.3 Алгоритм определения параметров $A_F$ и $\Delta T_t^{inf}$

Г.6.3.1 Для ОС, испытанных на ударный изгиб, формируют таблицу экспериментальных значений $\Delta T^j_{K\ exp}$, отвечающих величине флюенса нейтронов $F_j$ и времени облучения $t_j$, где $j$ — номер серии образцов ($j$ = 1, …, $L$, $L$ — количество серий образцов испытанных на ударный изгиб).

Для ОС, испытанных на вязкость разрушения, формируют таблицу экспериментальных значений $\Delta T^i_{100\ exp}$, отвечающих величине флюенса нейтронов $F_i$ и времени облучения $t_i$, где $i$ — номер серии образцов ($i$ = 1, …, $M$, $M$ — количество серий образцов, испытанных на вязкость разрушения).

Г.6.3.2 Задают значение $\Delta T_t^{inf}$ из диапазона от 0 °С до 40 °С.

Г.6.3.3 По формуле (Г.14) для моментов времени $t_j$ вычисляют значения $\Delta T^j_T$, а для моментов времени $t_i$ вычисляют $\Delta T^i_T$. Значения параметров в формуле (Г.14), кроме $\Delta T_t^{inf}$, определяют по таблице Г.3.

Г.6.3.4 На основании данных $\Delta T^j_{K\ exp}$ и $t_j$ вычисляют значения $\Delta T^j_{F=} \Delta T^j_{K\ exp} - \Delta T^j_F$ и формируют пары значений $\Delta T^j_F$ и $F_j$.

На основании данных $\Delta T^i_{100\ exp}$ и $t_i$ вычисляют значения $\Delta T^i_F = \Delta T^i_{100\ exp} - \Delta T^i_T$ и формируют пары значений $\Delta T^j_F$ и $F_i$.

Г.6.3.5 Пары значений $\Delta T^j_F$, $F_j$ и $\Delta T^j_F$, $F_i$ объединяют в один массив и аппроксимируют уравнением вида (Г.15), где $A_F$ определяют методом наименьших квадратов, а параметр $n$ определяют в соответствии с таблицей Г.2.

Г.6.3.6 Дисперсию $S^2$ вычисляют по формуле

$$S^2 = \frac{1}{L+M-1}\left(\sum_{j=1}^{L}(\Delta T_F(F_j) - \Delta T_F^j)^2 + \sum_{i=1}^{M}(\Delta T_F(F_i) - \Delta T_F^i)^2\right), \quad (Г.18)$$

где $L$ — количество серий образцов испытанных на ударный изгиб;

$\Delta T_F(F_j)$ — значение $\Delta T_F$, полученное по формуле (Г.15) при $F = F_j$;

$M$ — количество серий образцов, испытанных на вязкость разрушения;

$\Delta T_F(F_i)$ — значение $\Delta T_F$, полученное по формуле (Г.15) при $F = F_i$.

Г.6.3.7 Принимают, что при варьировании $\Delta T_t^{inf}$ от 0 °С до 40 °С истинные значения $A_F$ и $\Delta T_t^{inf}$ соответствуют условию

$$S^2 = \min. \quad (Г.19)$$

Г.6.4 На основании определенного из условия (Г.19) значения $\Delta T_t^{inf}$ и значений $t_{OT}$, $t_T$ и $b_T$, определенных по таблице (Г.3), вычисляют зависимость $\Delta T_T$ от $t$ по формуле (Г.14).

Г.6.5 На основании определенного из условия (Г.19) значения $A_F$ вычисляют $\Delta T_F$ по формуле (Г.15).

Г.6.6 Значение $\delta T_к$ вычисляют по формуле

$$\delta T_к = \begin{cases} 0, \text{ если } S^2 \le \sigma_{ОС}^2 \\ \sqrt{\left(S \cdot t_{0,05}\right)^2 \left(1 + 1/(L+M)\right) - \left(2\sigma_{ОС}\right)^2}, \text{ если } S > \sigma_{ОС} \end{cases}, \quad (Г.20)$$

где $\sigma_{ОС}$ — стандартное отклонение $T_к$, разброс значений которого связан с пространственной неоднородностью ОС, $\sigma_{ОС}$ = 7,5 °С;

$t_{0,05}$ — значение квантили распределения Стьюдента для уровня вероятности $P$, равной 0,975 ($P$ = 1 − 0,05/2), и для числа степеней свободы $k = L + M - 1$.

В случае, если определенное по формуле (Г.20) значение $\delta T_к$ > 20 °С, принимают $\delta T_к$ = 20 °С.

## Приложение Д
## (обязательное)

## Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ

### Д.1 Область применения

Д.1.1 Приложение устанавливает правила расчета вязкости разрушения ОМ и МШ корпусов ВВЭР-1200 и ВВЭР ТОИ.

Д.1.2 Приложение не распространяется на ОМ и МШ корпусов ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ, прошедших отжиг.

Д.1.3 Расчет вязкости разрушения проводят для следующих областей КР:

- облучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$;
- необлучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ не превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

### Д.2 Определение зависимости вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$

Д.2.1 Для ОМ и МШ температурную зависимость вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ , вычисляют по формуле

$$\bar{K}_{JC}(T) = k \cdot \left[ K_{JC}^{shelf} - K_{\min} + \Omega_{\text{расч}} \cdot a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T - a_2}{a_3} \right) \right) \right] + K_{\min}, \quad (Д.1)$$

где $k = 0{,}52$; $K_{JC}^{shelf} = 30$ МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ ; $K_{\min} = 20$ МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ ; $T$ — температура, °С;

если $T < 130$ °С, то $a_1 = 1$, $a_2 = 130$ °С, $a_3 = 105$ °С;

если $T \geq 130$ °С, то $a_1 = 1{,}99$, $a_2 = 216$ °С, $a_3 = 157$ °С;

$\Omega_{\text{расч}}$ — параметр материала, характеризующий температурную зависимость вязкости разрушения материала в текущем состоянии, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ .

Зависимость $\bar{K}_{JC}(T)$ отвечает длине фронта трещины $\bar{B} = 25$ мм и $P_f = 0{,}05$.

Д.2.2 Параметр $\Omega_{\text{расч}}$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ , в формуле (Д.1) вычисляют по формуле

$$\Omega_{\text{расч}} = \frac{70}{a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T_{100}^{\text{расч}} - a_2}{a_3} \right) \right)}, \quad (Д.2)$$

где если $T_{100}^{\text{расч}} < 130$ °С, то $a_1 = 1$, $a_2 = 130$ °С, $a_3 = 105$ °С;

если $T_{100}^{\text{расч}} \geq 130$ °С, то $a_1 = 1{,}99$, $a_2 = 216$ °С, $a_3 = 157$ °С.

Д.2.3 Значение $T_{100}^{\text{расч}}$ , °С, в формуле (Д.2) вычисляют по формулам:

- для необлучаемых областей КР

$$T_{100}^{\text{расч}} = T_{100}^{start} + \Delta T_T; \quad (Д.3а)$$

- для облучаемых областей КР

$$T_{100}^{\text{расч}} = T_{100}^{start} + \Delta T_F + \Delta T_T + \delta T_{\text{к}}, \quad (Д.3б)$$

где $T_{100}^{start}$ — значение $T_{100}$ для ОМ и МШ в исходном состоянии;

$\Delta T_F$ — сдвиг $T_{100}$ вследствие нейтронного облучения за время эксплуатации КР, °С;

$\Delta T_T$ — сдвиг $T_{100}$, обусловленный термическим старением, за время эксплуатации КР, °С;

$\delta T_{\text{к}}$ — температурный запас, °С.

### Д.3 Определение температуры $T_{100}^{start}$

Для необлучаемых и облучаемых областей КР $T_{100}^{start}$ вычисляют по следующим формулам для рассмотренных ниже случаев.

Д.3.1 В случае, если ОМ рассматриваемого элемента КР не представлен в Программе ОС и для него нет архивного металла, $T_{100}^{start}$ , °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{start} = T_{\text{к}0}^{\text{ТУ}} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \quad (Д.4)$$

где $T_{\text{к}0}^{\text{ТУ}}$ — критическая температура хрупкости согласно ТУ на материал, действующим на момент изготовления КР, °С; значение $T_{\text{к}0}^{\text{ТУ}}$ допускается определять согласно приложению У;

$\delta T_{cr\text{-}ch}$ — разность между $T_к$ и $T_{100}$, в общем случае, зависящая от материала, значение $\delta T_{cr\text{-}ch}$ определяют в соответствии с таблицей Д.1.

Д.3.2 В случае, если ОМ рассматриваемого элемента имеется в наличии в ОМ из ОС, предусмотренных для исследования ЗТВ, $T_{100}^{start}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{start} = \begin{cases} T_{100}^{\max}, \text{ если } T_{100}^{\max} \le T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \\ T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \text{ если } T_{100}^{\max} > T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \end{cases}. \quad (Д.5)$$

В формуле (Д.6) $T_{100}^{\max}$ вычисляют по формуле

$$T_{100}^{\max} = \max\left[\left(T_{к0}^{ОС} - \delta T_{cr\text{-}ch} + \delta T_{NH}\right), \left(T_{100}^{\Omega 0} + \delta T_{NH} + \delta T_{type}\right)\right], \quad (Д.6)$$

где $T_{к0}^{ОС}$ — значение критической температуры хрупкости для ОМ рассматриваемого элемента в исходном состоянии, определенное на ОМ из контрольного комплекта ОС ЗТВ на ударный изгиб;

$T_{100}^{\Omega 0}$ — значение $T_{100}$ для ОМ рассматриваемого элемента КР в исходном состоянии, определенное на ОМ из контрольного комплекта ОС ЗТВ, в том числе с применением технологии реконструкции образцов в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12—2018 (приложение Ж); определение $T_{100}^{\Omega 0}$ проводится согласно приложению Е;

$\delta T_{type}$ — запас на тип образца для образцов типа СТ и SE(B) 10 по ГОСТ Р 50.05.12:

$$\delta T_{type} = \begin{cases} 0\ °C\ - \text{ для образцов типа СТ и SE(B)-10 с глубокими боковыми} \\ \text{канавками (суммарно 50 \% от толщины образца)} \\ 15\ °C\ - \text{ для образцов типа SE(B)-10 без боковых канавок или} \\ \text{со стандартными боковыми канавками (суммарно 20 \%} \\ \text{от толщины образца)} \end{cases};$$

$\delta T_{NH}$ — запас на пространственную неоднородность характеристик материала, $\delta T_{NH}$ = 26 °С.

Д.3.3 В случае, если металл рассматриваемого элемента КР представлен в расширенном дополнительном (контрольном) комплекте или для него есть архивный металл, $T_{100}^{start}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{start} = \begin{cases} T_{100}^{\max}, \text{ если } T_{100}^{\max} \le T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \\ T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \text{ если } T_{100}^{\max} > T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch} \end{cases}. \quad (Д.7)$$

В формуле (Д.9) $T_{100}^{\max}$ вычисляют по формуле

$$T_{100}^{\max} = \max\left\{T_{ки} - \delta T_{cr\text{-}ch}, T_{100}^{\Omega 0} + \delta_{ки} + \delta T_{type}\right\}, \quad (Д.8)$$

где $T_{ки}$ — консервативная оценка значения критической температуры хрупкости, определенная по результатам испытаний образцов расширенного дополнительного (контрольного) комплекта или архивного металла в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12—2018 (приложение Б);

$\delta_{ки}$ — параметр, характеризующий пространственную неоднородность свойств металла элемента КР, определяемый по результатам испытаний образцов расширенного дополнительного (контрольного) комплекта или архивного металла в соответствии с ГОСТ Р 50.05.12—2018 (приложение Б).

Для упрощенной консервативной оценки $T_{100}^{\max}$ допускается использовать формулу (Д.6) вместо формулы (Д.8), при этом $T_{к0}^{ОС}$ вычисляют по результатам испытаний дополнительного (контрольного) комплекта ОС.

Таблица Д.1 — Значение $\delta T_{cr\text{-}ch}$, $\delta T_к$, $\Delta T_T$ и $\Delta T_F$

| Марка основного материала | Область материала | Вид материала | $\delta T_{cr\text{-}ch}$, °С | $\delta T_к$, °С | $\Delta T_T$, °С | $\Delta T_F$, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15Х2НМФА класс 1 | Необлучаемая | Основной металл | 38 | — | 20 | — |
| | | Металл шва А | 23 | | | |
| | | Металл шва Б | 23 | | | |
| | Облучаемая | Основной металл | 38 | 38 | см. формулу (Д.9) | см. формулу (Д.10), таблицу, Д.3 |
| | | Металл шва А | 23 | 20 | | |
| | | Металл шва Б | 23 | | | |

*Окончание таблицы Д.1*

| Марка основного материала | Область материала | Вид материала | $\delta T_{cr\text{-}ch}$, °С | $\delta T_к$, °С | $\Delta T_T$, °С | $\Delta T_F$, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15Х2НМФА А | Необлучаемая | Основной металл | 38 | — | 30 | — |
| | | Металл шва А | 23 | | | |
| | | Металл шва Б | 23 | | | |
| 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б | Необлучаемая | Основной металл | 38 | — | 20 | — |
| | | Металл шва В | 38 | | | |
| | | Металл шва Г | 23 | | | |
| | Облучаемая | Основной металл | 38 | 22 | 0 | см. формулу (Д.10), таблицу Д.4 |
| | | Металл шва В | 38 | 20 | | |
| | | Металл шва Г | 23 | | | |

Примечания

1 Металл шва А — металл шва, выполненный АДС проволокой Св-12Х2Н2МАА с содержанием никеля $C_{Ni} \le 1{,}3$ %.

2 Металл шва Б — металл шва, выполненный АДС проволокой Св-09ХГНМТАА-ВИ.

3 Металл шва В — металл шва, выполненный АДС проволокой Св-10ХМФТУ-А.

4 Металл шва Г — металл шва, выполненный АДС проволокой Св-15ХГМТА.

Д.3.4 В случае, если при расчете по формулам (Д.5), (Д.6) или (Д.7), (Д.8) $T_{100}^{\Omega 0} > T_{к0}^{ТУ} - \delta T_{cr\text{-}ch}$, то изложенная в Д.3 процедура расчета $T_{100}^{start}$ не может быть использована.

**Д.4 Определение $\Delta T_T$**

Д.4.1 Для необлучаемых областей КР значение $\Delta T_T$ в формуле (Д.3а) принимают по таблице Д.1.

Д.4.2 Для облучаемых областей КР для ОМ и МШ стали 15Х2МФА-А мод.А и мод.Б значение $\Delta T_T$ в формуле (Д.3б) принимают в соответствии с таблицей Д.1.

Д.4.3 Для облучаемых областей КР для ОМ и МШ стали 15Х2НМФА класс 1 значение $\Delta T_T$, °С, в формуле (Д.3б) в соответствии с таблицей Д.1 вычисляют по формуле

$$\Delta T_T = \left( \Delta T_t^{inf} + b_T \exp\left( \frac{t_T - t}{t_{OT}} \right) \right) \cdot th\left( \frac{t}{t_{OT}} \right), \quad (Д.9)$$

где $\Delta T_t^{inf}$ — сдвиг критической температуры хрупкости при $t = \infty$;

$t_{OT}$, $t_T$ и $b_T$ — константы материала, зависящие от температуры старения;

$t$ — время эксплуатации КР, ч.

Значения параметров $t_{OT}$, $t_T$, $b_T$ и $\Delta T_t^{inf}$ в формуле (Д.9) принимают согласно таблице Д.2.

Таблица Д.2 — Значения параметров $t_{OT}$, $t_T$, $b_T$ и $\Delta T_t^{inf}$ в формуле (Д.9)

| Материал | $b_T$, °С | $t_{OT}$, ч | $t_T$, ч | $\Delta T_t^{inf}$, °С |
|---|---|---|---|---|
| Основной металл и металл шва | 26,2 | 32700 | 40700 | 2 |

**Д.5 Определение $\Delta T_F$ и $\delta T_к$ по аналитическим формулам**

Д.5.1 Для облучаемых областей КР $\Delta T_F$, °С, в формуле (Д.3б) в соответствии с таблицей Д.1 вычисляют по формуле

$$\Delta T_F = A_F \cdot \left( \frac{F}{F_0} \right)^n, \quad (Д.10)$$

где $A_F$ — коэффициент радиационного охрупчивания, °С;

$n$ — константа материала;

$F$ — флюенс нейтронов с энергией $E > 0{,}5$ МэВ, 1/м$^2$; отсчитываемый от начала эксплуатации реактора;

$F_0 = 10^{22}$ 1/м$^2$.

Значения $A_F$ и $n$ приведены в таблицах Д.3 и Д.4.

Таблица Д.3 — Значения коэффициентов радиационного охрупчивания $A_F$ и $n$ для стали марки 15Х2НМФА класс 1 и ее металла шва при температуре облучения от 290 °С до 310 °С

| Вид материала | $A_F$, °С | $n$ |
|---|---|---|
| Сталь марки 15Х2НМФА класс 1 | 1,45 | 0,8 |
| Металл шва, выполненный АДС проволокой марок Св-09ХГНМТАА-ВИ и Св-12Х2Н2МАА с $C_{Ni} \le 1{,}3$ % | 1,9 | |
| Примечание — Расчет $A_F$ для ОМ и МШ может быть использован при $F \le 6{,}4 \cdot 10^{23}$ 1/м$^2$. | | |

Таблица Д.4 — Значения коэффициентов радиационного охрупчивания $A_F$ и $n$ для стали марки 15Х2МФА-А мод. А и мод.Б и ее сварного шва при температуре облучения от 270 °С до 310 °С

| Вид материала | $A_F$, °С | $n$ |
|---|---|---|
| Сталь марки 15Х2МФА-А мод. А и мод.Б | 3,6 | 0,483 |
| Металл шва, выполненный АДС проволокой марок Св-10ХМФТУ-А и Св-15ХГМТА | 9,4 | 1/3 |
| Примечания<br>1 Расчет $A_F$ для ОМ стали 15Х2МФА-А мод. А и мод.Б может быть использован при $F \le 3 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$.<br>2 Расчет $A_F$ для МШ стали 15Х2МФА-А мод. А и мод.Б может быть использован при $F \le 1{,}4 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$. | | |

Д.5.2 Значение $\delta T_к$ в формуле (Д.3б) принимают по таблице Д.1.

### Д.6 Определение $\Delta T_T$, $\Delta T_F$ и $\delta T_к$ по результатам испытаний образцов свидетелей

Настоящий раздел распространяется на ОМ и МШ облучаемых областей КР

Д.6.1 Для определения $\Delta T_T$, $A_F$ и $\delta T_к$ по результатам испытаний ОС в облученном состоянии должно быть испытанно не менее шести серий образцов, облученных до разных значений флюенса нейтронов. Флюенс нейтронов для любого образца, принадлежащего к одной серии, не должен отличаться более чем на 10 % от среднего значения для этой группы. Для одной серии образцов целесообразно испытывать не менее 12 ОС.

Д.6.2 Алгоритм определения $A_F$, $\Delta T_T$ и $\delta T_к$ для ОМ и МШ для стали 15Х2НМФА класса 1.

Д.6.2.1 Для ОС, испытанных на ударный изгиб, формируют таблицу экспериментальных значений $\Delta T^j_{к\,exp}$, отвечающих величине флюенса нейтронов $F_j$ и времени облучения $t_j$, где $j$ — номер серии образцов ($j$ = 1, …, $L$, $L$ — количество серий образцов испытанных на ударный изгиб).

Для ОС, испытанных на вязкость разрушения, формируют таблицу экспериментальных значений $\Delta T^i_{100\,exp}$, отвечающих величине флюенса нейтронов $F_i$ и времени облучения $t_i$, где $i$ — номер серии образцов ($i$ = 1 ,… , $M$, $M$ — количество серий образцов испытанных на вязкость разрушения).

Д.6.2.2 Задают значение $\Delta T_t^{inf}$ из диапазона от 0 °С до 40 °С.

Д.6.2.3 По формуле (Д.9) для моментов времени $t_j$ вычисляют значения $\Delta T^j_T$, а для моментов времени $t_i$ вычисляют $\Delta T^i_T$. Значения параметров в формуле (Д.9), кроме $\Delta T_t^{inf}$, определяют по таблице Д.2.

Д.6.2.4 На основании данных $\Delta T^j_{к\,exp}$ и $t_j$ вычисляют значения $\Delta T^j_F = \Delta T^j_{к\,exp} - \Delta T^j_T$ и формируют пары значений $\Delta T^j_F$ и $F_j$.

На основании данных $\Delta T^i_{100\,exp}$ и $t_i$ вычисляют значения $\Delta T^i_F = \Delta T^i_{100\,exp} - \Delta T^i_T$ и формируют пары значений $\Delta T^i_F$ и $F_i$.

Д.6.2.5 Пары значений $\Delta T^i_F$, $F_j$ и $\Delta T^i_F$, $F_i$ объединяют в один массив и аппроксимируют уравнением вида (Д.10), где $A_F$ определяют методом наименьших квадратов, а параметр $n$ принимают по таблице Д.1.

Д.6.2.6 Дисперсия $S^2$ вычисляют по формуле

$$S^2 = \frac{1}{L+M-1}\left(\sum_{j=1}^{L}(\Delta T_F(F_j) - \Delta T_F^j)^2 + \sum_{i=1}^{M}(\Delta T_F(F_i) - \Delta T_F^i)^2\right), \qquad (Д.11)$$

где $L$ — количество серий образцов испытанных на ударный изгиб;

$\Delta T_F(F_j)$ — значение $\Delta T_F$, полученное по формуле (Д.10) при $F = F_j$;

$M$ — количество серий образцов испытанных на вязкость разрушения;

$\Delta T_F(F_i)$ — значение $\Delta T_F$, полученное по формуле (Д.10) при $F = F_i$.

Д.6.2.7 Принимается, что при варьировании $\Delta T_t^{inf}$ от 0 °С до 40 °С истинные значения $A_F$ и $\Delta T_t^{inf}$ соответствуют условию

$$S^2 = \min. \qquad (Д.12)$$

Д.6.2.8 На основании определенного из условия (Д.12) значения $\Delta T_t^{inf}$ и значений $t_{OT}$, $t_T$ и $b_T$, определенных по таблице (Д.2), вычисляют зависимость $\Delta T_T$ от $t$ по формуле (Д.9).

Д.6.2.9 На основании определенного из условия (Д.12) значения $A_F$ вычисляют $\Delta T_F$ по формуле (Д.10).

Д.6.2.10 Значение $\delta T_к$, °С, вычисляют по формуле

$$\delta T_к = \begin{cases} 0, \text{ если } S^2 \le \sigma_{ОС}^2 \\ \sqrt{\left(S \cdot t_{0,05}\right)^2 \left(1 + 1/\left(L + M\right)\right) - \left(2\sigma_{ОС}\right)^2}, \text{ если} > \sigma_{ОС} \end{cases}, \quad (Д.13)$$

где $\sigma_{ОС}$ — стандартное отклонение $T_к$, разброс значений которого связан с пространственной неоднородностью ОС, $\sigma_{ОС}$ = 7,5 °С;

$t_{0,05}$ — значение квантили распределения Стьюдента для уровня вероятности $P$ = 0,975 ($P$ = 1 − 0,05/2) и для числа степеней свободы $k = L + M - 1$.

В случае, если рассчитанное по формуле (Д.13) значение $\delta T_к$ больше чем значение $\delta T_к$, приведенное в таблице Д.1, используют значение $\delta T_к$ приведенное в таблице Д.1.

Д.6.3 Алгоритм определения $A_F$, $\Delta T_T$ и $\delta T_к$ для ОМ и МШ для стали 15Х2МФА-А.

Д.6.3.1 Значение $\Delta T_T$ для ОМ и МШ для стали 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б принимают по таблице Д.1.

Д.6.3.2 Для ОС, испытанных на ударный изгиб, формируют таблицу экспериментальных значений $\Delta T^i_{к\ exp}$, отвечающих величине флюенса нейтронов $F_j$ и времени облучения $t_j$, где $j$ — номер серии образцов ($j$ = 1,…, $L$, $L$ — количество серий образцов испытанных на ударный изгиб).

Д.6.3.3 Для ОС, испытанных на вязкость разрушения, формируют таблицу экспериментальных значений $\Delta T^i_{100\ exp}$, отвечающих величине флюенса нейтронов $F_i$ и времени облучения $t_i$, где $i$ — номер серии образцов ($i$ = 1,…, $M$, $M$ — количество серий образцов, испытанных на вязкость разрушения).

Принимается, что $\Delta T^j_F = \Delta T^j_{к\ exp}$, а $\Delta T^i_F = \Delta T^i_{100\ exp}$.

Д.6.3.4 Пары значений $\Delta T^j_F$, $F_j$ и $\Delta T^i_F$, $F_i$ объединяют в один массив и аппроксимируют уравнением вида (Д.10), где $A_F$ определяют методом наименьших квадратов, а параметр $n$ принимают по таблице Д.1.

Д.6.3.5 На основании определенного значения $A_F$ вычисляют $\Delta T_F$ по формуле (Д.10).

Д.6.3.6 Дисперсию $S^2$, обусловленную пространственной неоднородностью материала, вычисляют по формуле (Д.11).

Д.6.3.7 На основании параметра $S$ вычисляют $\delta T_к$ по формуле (Д.13).

В случае, если рассчитанное по формуле (Д.13) значение $\delta T_к$ больше чем значение $\delta T_к$, приведенное в таблице Д.1, используют значение $\delta T_к$, приведенное в таблице Д.1.

## Приложение Е
## (обязательное)

## Определение параметров температурной зависимости вязкости разрушения по результатам испытаний образцов свидетелей

Параметры температурной зависимости вязкости разрушения $\Omega$ и $T_{100}$ определяют на основании результатов испытаний образцов свидетелей (ОС) материалов КР на вязкость разрушения.

Тип и размеры ОС, процедура выращивания усталостной трещины, процедура испытаний, процедура определения значений вязкости разрушения $K_{JC}$, процедура группировки ОС в серию образцов для определения $\Omega$ и $T_{100}$ для заданного состояния материала должны соответствовать ГОСТ Р 50.05.12.

Условия испытаний и требования к испытательному оборудованию не регламентированные ГОСТ Р 50.05.12 должны соответствовать ГОСТ Р 59115.6.

Значения $\Omega$ и $T_{100}$ вычисляют на основании результатов испытаний образцов свидетелей по следующим формулам.

В случае однотемпературных испытаний в соответствии с методом наибольшего правдоподобия параметр масштаба $K_0$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$, вычисляют по формуле

$$K_0 = \left[ \sum_{k=1}^{N} (K_{JC}^{(k)} - K_{\min})^4 / r \right]^{1/4} + K_{\min}, \tag{E.1}$$

где $N$ — общее количество испытанных образцов; $r$ — количество образцов для которых $K_{JC} < K_{JC(\text{limit})}$ согласно ГОСТ Р 50.05.12, $K_{\min}$ = 20 МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$.

Далее $K_{JC(med)}$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$, вычисляют по формуле

$$K_{JC(med)} = K_{\min} + (K_0 - K_{\min}) [\ln(2)]^{1/4}. \tag{E.2}$$

По известному $K_{JC(med)}$ при $T = T_{\text{исп}}$ значение параметра $\Omega$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$, вычисляют по формуле

$$\Omega = \frac{K_{JC(med)} - K_{JC}^{shelf}}{a_1 \cdot \left(1 + \text{th}\left(\frac{T_{\text{исп}} - a_2}{a_3}\right)\right)}, \tag{E.3}$$

где если $T_{\text{исп}} \le 130$ °С, то $a_1 = 1$, $a_2 = 130$ °С, $a_3 = 105$ °С;
если $T_{\text{исп}} > 130$ °С, то $a_1 = 1{,}99$, $a_2 = 216$ °С, $a_3 = 157$ °С;
$K_{JC}^{shelf}$ = 30 МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$.

В случае многотемпературных испытаний параметр $\Omega$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$, определяют посредством решения нелинейного уравнения

$$\sum_{i=1}^{N} \left[ f(T_i) \left( \frac{\ln(2)\left(K_{JC(i)} - K_{\min}\right)^4}{\left(\Omega \cdot f(T_i) + K_{JC}^{shelf} - K_{\min}\right)^5} - \frac{\delta_i}{\Omega \cdot f(T_i) + K_{JC}^{shelf} - K_{\min}} \right) \right] = 0, \tag{E.4}$$

где
$$f(T_i) = \begin{cases} \left(1 + \text{th}\left(\frac{T_i - 130}{105}\right)\right), \text{ если } T_i \le 130\ ^\circ\text{C} \\ 1{,}99 \cdot \left(1 + \text{th}\left(\frac{T_i - 216}{157}\right)\right), \text{ если } T_i > 130\ ^\circ\text{C} \end{cases};$$

$K_{JC(i)}$ — значение $K_{JC}$, полученное из эксперимента при $T_{\text{исп}} = T_i$;

$\delta_i$ — равно 1, если $K_{JC(i)}$ корректно, и равно 0, если данное значение некорректно согласно ГОСТ Р 50.05.12.

Значение $T_{100}$, °С вычисляют по формуле

$$T_{100} = a_3 \,\text{arcth}\left(\frac{70}{\Omega a_1} - 1\right) + a_2, \tag{E.5}$$

где если $T_{100} \le 130$ °С, $a_1 = 1$, $a_2 = 130$ °С, $a_3 = 105$ °С;
если $T_{100} > 130$ °С, $a_1 = 1{,}99$, $a_2 = 216$ °С, $a_3 = 157$ °С.

## Приложение Ж
## (обязательное)

# Вязкость разрушения основного металла и металла шва корпуса реактора проектируемых реакторных установок ВВЭР

### Ж.1 Область применения

Ж.1.1 Приложение устанавливает правила расчета вязкости разрушения ОМ и МШ КР проектируемых реакторных установок ВВЭР.

Ж.1.2 Расчет вязкости разрушения проводят для следующих областей КР:

- облучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$;
- необлучаемая область — зона КР, для которой на конец рассматриваемого срока эксплуатации флюенс нейтронов с энергией $E \geq 0{,}5$ МэВ не превышает значение $10^{22}$ 1/м$^2$.

### Ж.2 Определение зависимости вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$

Ж.2.1 Для ОМ и МШ температурная зависимость вязкости разрушения $\bar{K}_{JC}(T)$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$, вычисляют по формуле

$$\bar{K}_{JC}(T) = k \cdot \left[ K_{JC}^{shelf} - K_{\min} + \Omega_{\text{расч}} \cdot a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T - a_2}{a_3} \right) \right) \right] + K_{\min}, \qquad (Ж.1)$$

где $k = 0{,}52$;

$K_{JC}^{shelf} = 30$ МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$; $K_{\min} = 20$ МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$; $T$ — температура, °С;

если $T < 130$ °С, то $a_1 = 1$, $a_2 = 130$ °С, $a_3 = 105$ °С;

если $T \geq 130$ °С, то $a_1 = 1{,}99$, $a_2 = 216$ °С, $a_3 = 157$ °С;

$\Omega_{\text{расч}}$ — параметр материала, характеризующий температурную зависимость вязкости разрушения материала в текущем состоянии, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$.

Зависимость $\bar{K}_{JC}(T)$ отвечает длине фронта трещины $\bar{B} = 25$ мм и $P_f = 0{,}05$.

Ж.2.2 Параметр $\Omega_{\text{расч}}$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$, в формуле (Ж.1) вычисляют по формуле

$$\Omega_{\text{расч}} = \frac{70}{a_1 \cdot \left( 1 + \text{th}\left( \frac{T_{100}^{\text{расч}} - a_2}{a_3} \right) \right)}, \qquad (Ж.2)$$

где если $T_{100}^{\text{расч}} < 130$ °С, то $a_1 = 1$, $a_2 = 130$ °С, $a_3 = 105$ °С;

если $T_{100}^{\text{расч}} \geq 130$ °С, то $a_1 = 1{,}99$, $a_2 = 216$ °С, $a_3 = 157$ °С.

Ж.2.3 Расчет $T_{100}^{\text{расч}}$, °С, в формуле (Ж.2) вычисляют по формуле

$$T_{100}^{\text{расч}} = \begin{cases} T_{100}^{start} + \Delta T_T & \text{для необлучаемых областей КР} \\ T_{100}^{start} + \Delta T_F + \Delta T_T + \delta T_{\text{к}} & \text{для облучаемых областей КР} \end{cases}, \qquad (Ж.3)$$

где $T_{100}^{start}$ — значение $T_{100}$ для ОМ и МШ в исходном состоянии;

$\Delta T_F$ — сдвиг $T_{100}$ вследствие нейтронного облучения за время эксплуатации КР, °С;

$\Delta T_T$ — сдвиг $T_{100}$, обусловленный термическим старением, за время эксплуатации КР, °С;

$\delta T_{\text{к}}$ — температурный запас на неоднородность свойств, обусловленную облучением ОС, °С.

### Ж.3 Определение температуры $T_{100}^{start}$

Для необлучаемых и облучаемых областей КР значение $T_{100}^{start}$, °С, вычисляют по формуле

$$T_{100}^{start} = T_{\text{к0}}^{\text{ТУ}} - \delta T_{cr\text{-}ch}, \qquad (Ж.4)$$

где $T_{\text{к0}}^{\text{ТУ}}$ — критическая температура хрупкости согласно ТУ на материал, значение $T_{\text{к0}}^{\text{ТУ}}$ допускается принимать согласно приложению У;

$\delta T_{cr\text{-}ch}$ — разность между $T_{\text{к}}$ и $T_{100}$, в общем случае зависящая от материала, значение $\delta T_{cr\text{-}ch}$ принимают по таблице Ж.1.

### Ж.4 Определение $\Delta T_T$

Ж.4.1 Для необлучаемых областей КР значение $\Delta T_T$ в формуле (Ж.3) принимают по таблице Ж.1.

Ж.4.2 Для облучаемых областей КР для ОМ и МШ стали 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б значение $\Delta T_T$ в формуле (Ж.3) принимают по таблице Ж.1.

Таблица Ж.1 — Значения $\delta T_{cr\text{-}ch}$, $\delta T_к$ и $\Delta T_T$

| Марка основного материала | Область материала | Вид материала | $\delta T_{cr\text{-}ch}$, °С | $\delta T_к$, °С | $\Delta T_T$, °С |
|---|---|---|---|---|---|
| 15Х2НМФА класс 1 | Необлучаемая | Основной металл | 38 | — | 20 |
| | | Металл шва А | 23 | | |
| | | Металл шва Б | 23 | | |
| | Облучаемая | Основной металл | 38 | 38 | см. формулу (Ж.4) |
| | | Металл шва А | 23 | 20 | |
| | | Металл шва Б | 23 | | |
| 15Х2НМФА-А | Необлучаемая | Основной металл | 38 | — | 30 |
| | | Металл шва А | 23 | | |
| | | Металл шва Б | 23 | | |
| 15Х2МФА-А (мод. А и мод. Б) | Необлучаемая | Основной металл | 38 | — | 20 |
| | | Металл шва В | 38 | | |
| | | Металл шва Г | 23 | | |
| | Облучаемая | Основной металл | 38 | 22 | 0 |
| | | Металл шва В | 38 | 20 | |
| | | Металл шва Г | 23 | | |

Примечания

1 Металл шва А — металл шва выполненный АДС проволокой Св-12Х2Н2МАА с содержанием никеля $C_{Ni} \le 1{,}3$ %.

2 Металл шва Б — металл шва, выполненный АДС проволокой Св-09ХГНМТАА-ВИ.

3 Металл шва В — металл шва, выполненный АДС проволокой Св-10ХМФТУ-А.

4 Металл шва Г — металл шва, выполненный АДС проволокой Св-15ХГМТА.

Ж.4.3 Для облучаемых областей КР для ОМ и МШ стали 15Х2НМФА класс 1 значение $\Delta T_T$ в формуле (Ж.3) вычисляют по формуле

$$\Delta T_T = \left( \Delta T_t^{inf} + b_T \exp\left( \frac{t_T - t}{t_{OT}} \right) \right) \cdot \text{th}\left( \frac{t}{t_{OT}} \right), \qquad (Ж.5)$$

где $\Delta T_t^{inf}$ — сдвиг критической температуры хрупкости при $t = \infty$,°С;

$t_{OT}$, $t_T$ и $b_T$ — константы материала, зависящие от температуры старения;

$t$ — время эксплуатации КР, ч.

Значения параметров $t_{OT}$, $t_T$, $b_T$ и $\Delta T_t^{inf}$ в формуле (Ж.4) принимают по таблице Ж.2.

Таблица Ж.2 — Значения параметров $t_{OT}$, $t_T$, $b_T$ и $\Delta T_t^{inf}$

| Материал | $b_T$, °С | $t_{OT}$, ч | $t_T$, ч | $\Delta T_t^{inf}$, °С |
|---|---|---|---|---|
| Основной металл | 26,2 | 32700 | 40700 | 2 |
| Металл шва с содержанием никеля ≤ 1,3 % | 26,2 | 32700 | 40700 | 2 |
| Металл шва с содержанием никеля > 1,3 % | 10,1 | 23200 | 40900 | 18 |

### Ж.5 Определение $\Delta T_F$ и $\delta T_к$

Ж.5.1 Для облучаемых областей КР $\Delta T_F$, °С, в формуле (Ж.3) вычисляют по формуле

$$\Delta T_F = A_F \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^n, \qquad (Ж.6)$$

где $A_F$ — коэффициент радиационного охрупчивания, °С;

$n$ — константа материала;

$F$ — флюенс нейтронов с энергией $E > 0{,}5$ МэВ, отсчитываемый от начала эксплуатации реактора 1/м$^2$;

$F_0 = 10^{22}$ 1/м$^2$.

Значения $A_F$ и $n$ приведены в таблицах Ж.3 и Ж.4.

Таблица Ж.3 — Значения коэффициентов радиационного охрупчивания $A_F$ и $n$ для стали марки 15Х2НМФА класс 1 и ее металла шва при температуре облучения от 290 °С до 310°С

| Вид материала | $A_F$, °С | $n$ |
|---|---|---|
| Сталь марки 15Х2НМФА класс 1 | 1,45 | 0,8 |
| Металл шва, выполненный АДС проволокой марок Св-09ХГНМТАА-ВИ и Св-12Х2Н2МАА с $C_{Ni} \le 1{,}3$ % | 1,9 | |
| Примечание — Расчет $A_F$ для ОМ и МШ может быть использован при $F \le 6{,}4 \cdot 10^{23}$ 1/м$^2$. | | |

Таблица Ж.4 — Значения коэффициентов радиационного охрупчивания $A_F$ и $n$ для стали марки 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б и ее сварного шва при температуре облучения от 270 °С до 310 °С

| Вид материала | $A_F$, °С | $n$ |
|---|---|---|
| Сталь марки 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б | 3,6 | 0,483 |
| Металл шва, выполненный АДС проволокой марки Св-10ХМФТУ-А, Св-15ХГМТА | 9,4 | 1/3 |
| Примечания<br>1 Расчет $A_F$ для ОМ и МШ стали 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б может быть использован при $F \le 3 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$.<br>2 Расчет $A_F$ для МШ стали 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б может быть использован при $F \le 1{,}4 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$. | | |

## Приложение И
## (обязательное)

## Расчет коэффициентов, учитывающих влияние коротких трещин и двухосного нагружения на вязкость разрушения

Коэффициенты $\omega$ и $\omega_b$, учитывающие влияние коротких трещин и двухосное нагружение на вязкость разрушения, вычисляют по формулам:

- при $a_р > 0,15(S_Н + S_{КР})$

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

- при $a_р \le 0,15(S_Н + S_{КР})$

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

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

где

$$m = 2,55 \cdot a_р / \left(K_{JC}^{Вр} / R_{p0,2}(T,F)\right)^2; \tag{И.3}$$

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

$a_р$ — глубина расчетного дефекта;

$K_{JC}^{Вр} = \left(\dfrac{\bar{B}}{B_р}\right)^{1/4} \cdot (\bar{K}_{JC} - K_{min}) + K_{min}$ — вязкость разрушения при длине фронта трещины $B_р$ и $P_f = 0,05$;

$\bar{K}_{JC}$ — вязкость разрушения для длины фронта трещины $\bar{B} = 25$ мм и $P_f = 0,05$ (определяют для различных РУ ВВЭР в соответствии с приложениями Б, В, Г, Д и Ж);

$R_{p0,2}(T, F)$ — предел текучести облученного ОМ или МШ при температуре $T$ и флюенсе нейтронов $F$ (рекомендуется определять в соответствии с приложением Н);

$S_{КР}$ — толщина стенки КР;

$S_Н$ — толщина антикоррозионной наплавки;

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

При использовании в качестве $R_{p0,2}(T, 0)$ (определяемого согласно приложению Н) гарантированных значений предела текучести для консервативной оценки вязкости разрушения допускается принимать в формуле (И.3) вместо $R_{p0,2}(T, F)$ значение $R_{p0,2}(T, F) + 100$ МПа.

Зависимость $\omega_b$ от $\beta$ может быть использована при $0 \le \beta \le 2$. При $\beta < 0$ следует принимать $\omega_b = 1$. При $\beta > 2$ следует принимать $\omega_b = 0,8$.

Зависимость $\omega$ от $m$ приведена на рисунке И.1.

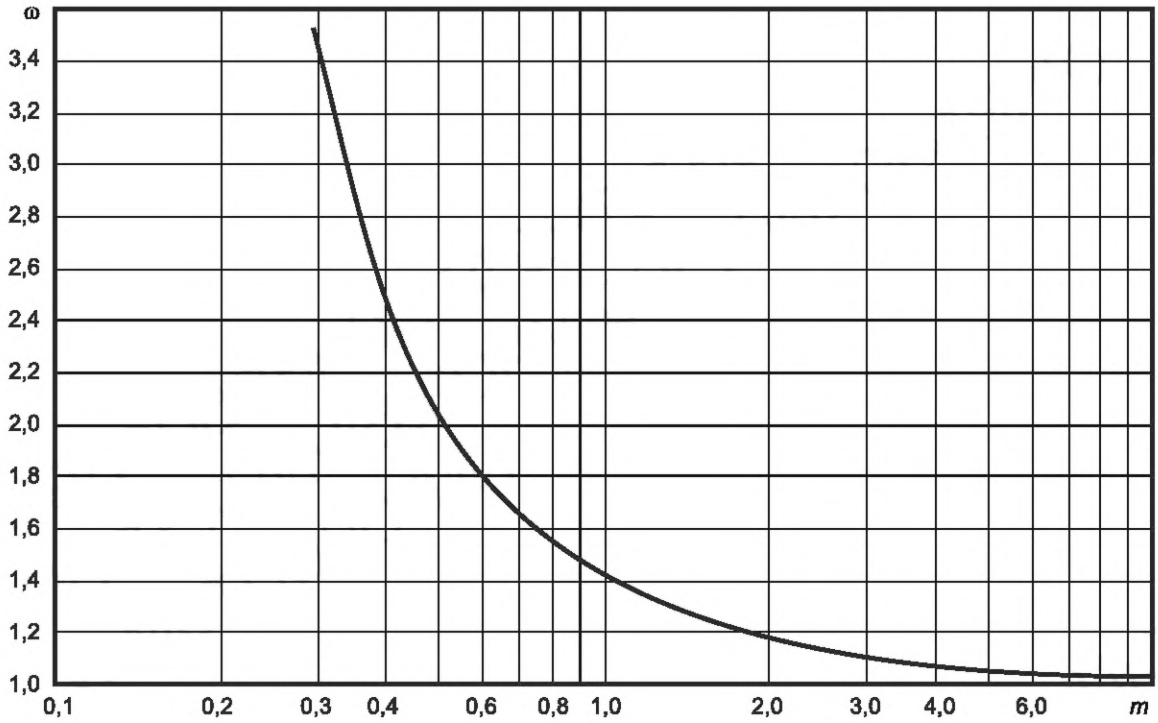



Рисунок И.1 — График зависимости ω от *m*

## Приложение К
## (обязательное)

## Вязкость разрушения основного металла и металла шва на верхнем шельфе

Для ОМ и МШ зависимость величины вязкости разрушения на верхнем шельфе $K_{JC}^{\text{ВШ}}$, МПа $\cdot \sqrt{\text{м}}$ от флюенса нейтронов $F$ и температуры $T$ вычисляют по формулам:

$$K_{JC}^{\text{ВШ}}(T,F) = \sqrt{\frac{J_C^{\text{ВШ}}(T,F)\cdot E}{\left(1-\nu^2\right)\cdot 10^3}}, \tag{К.1}$$

$$J_C^{\text{ВШ}}(T,F) = J_C^{*}\cdot\left(1-C\cdot\left(\Delta T_F+\Delta T_T+\delta T_{\text{к}}\right)-D\right)\cdot\frac{R_{p0,2}(T,F)}{R_{p0,2}(20,F)}, \tag{К.2}$$

где $J_C^{*}$ — величина $J_C$ при флюенсе нейтронов $F = 0$ и температуре $T = 20$ °С;

$R_{p0,2}(T, F)$ — предел текучести ОМ или МШ при температуре $T$ и флюенсе нейтронов $F$;

$E$ — модуль упругости;

$\nu$ — коэффициент Пуассона.

В формуле (К.2) следует принимать $C = 2{,}4 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$, $D = 0{,}14$, $J_C^{*} = 175$ Н/мм.

Значения $\Delta T_F$, $\Delta T_T$ и $\delta T_{\text{к}}$ определяют в соответствии с приложениями Б, В, Г, Д и Ж.

Значение $R_{p0,2}(T, F)$ рекомендуется определять согласно приложению Н.

В формулах (К.1) и (К.2) $J_C$ в Н/мм, $E$ и $R_{p0,2}$ в МПа, $T$ и $\Delta T_{\text{к}}$ в °С, $F$ в 1/м$^2$.

Формулы настоящего приложения могут быть использованы при $T \le 350$ °С и $\Delta T_F + \Delta T_T + \delta T_{\text{к}} \le 200$ °С.

Примечание — При расчетах по формулам настоящего приложения для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, отсчет флюенса нейтронов $F$ начинают с начала ввода в эксплуатацию КР, а для облучаемых областей, прошедших отжиг, отсчет флюенса нейтронов $F$ начинают с момента начала эксплуатации КР после отжига.

## Приложение Л
## (обязательное)

## Вязкость разрушения антикоррозионного покрытия (металла наплавки)

### Л.1 Характеристики трещиностойкости металла наплавки

В качестве характеристик трещиностойкости антикоррозионного покрытия (МН) используют следующие параметры: $J_R$-кривые, $J_C$, $J_C^{20}$ и $J_C^{ск}$. Критическое значение $J$-интеграла, $J_C$, определяют на основе экспериментальных данных как $J_C = \min\{J_{0,2}, J_{jump}\}$, где $J_{0,2}$ — величина $J$-интеграла, определенная как пересечение $J_R$-кривой с линией параллельной линии притупления и отстоящей от нее на 0,2 мм, $J_{jump}$ — величина $J$-интеграла, отвечающая 1-му хрупкому проскоку трещины в образце при его испытаниях на трещиностойкость. При отсутствии хрупких проскоков трещины принимают $J_C = J_{0,2}$. Величина $J_C^{20}$ — значение $J_C$ при $T = 20$ °С. Величина $J_C^{ск}$ — минимальное значение $J_C^{20}$, при котором отсутствуют хрупкие проскоки трещины в МН.

### Л.2 Критическое значение $J$-интеграла $J_C^{20}(F)$

Зависимость $J_C$, Н/мм, от флюенса нейтронов $F$ при 20 °С вычисляют по формулам:

- для необлучаемых областей и облучаемых областей, не прошедших отжиг,

$$J_C^{20}(F) = R_{p0,2}(20,F)\cdot\left[0{,}015 + 0{,}174\cdot\exp\left(-4{,}5\cdot10^{-3}\cdot\left(\frac{F}{F_0}\right)\right)\right]; \quad (Л.1)$$

- для облучаемых областей, прошедших отжиг,

$$J_C^{20}(F) = R_{p0,2}(20,F)\cdot\left[0{,}015 + 0{,}174\cdot\exp\left(-4{,}5\cdot10^{-3}\cdot\left(\frac{F+F_{ост}}{F_0}\right)\right)\right], \quad (Л.2)$$

где $F$ — флюенс нейтронов;

$R_{p0,2}(20, F)$ — предел текучести при 20 °С и флюенсе нейтронов $F$;

$F_0 = 10^{22}$ 1/м$^2$.

В формуле (Л.1) расчет предела текучести $R_{p0,2}(20, F)$ приведен в приложении Н, при этом отсчет флюенса нейтронов $F$ начинают с начала ввода в эксплуатацию КР.

В формуле (Л.2) расчет предела текучести $R_{p0,2}(20, F)$ приведен в приложении Н, при этом отсчет флюенса нейтронов $F$ начинают с момента начала эксплуатации КР после отжига.

В формуле (Л.2) величина $F_{ост}$ определяют по следующей процедуре.

Если $F_{отж} \le F^*$, то $F_{ост} = F_{отж}$, где $F_{отж}$ — флюенс нейтронов на момент отжига; $F^*$ — значение флюенса нейтронов, при котором зависимость $J_C^{20}(F)$, определяемая по формуле (Л1), имеет максимум $J_C^{max}$.

Если $F_{отж} > F^*$, то величину $F_{ост}$ определяют из решения уравнения

$$J_C^{(l)}(F_{ост}) = J_C^{(l)}(F_{отж}) + \eta_J\cdot(J_C^{max} - (J_C^{(l)}(F_{отж})), \quad (Л.3)$$

где $J_C^{(l)}(F_{ост})$ — величина $J_C^{20}$, рассчитанная по формуле (Л.1) при флюенсе нейтронов $F = F_{ост}$;

$J_C^{(l)}(F_{отж})$ — величина $J_C^{20}$, рассчитанная по формуле (Л.1) при флюенсе нейтронов на момент отжига $F = F_{отж}$;

$\eta_J$ — коэффициент изменения $J_C$ после отжига.

При наличии двух корней уравнения (Л.3) выбирают $F_{ост} > F^*$.

Величину $\eta_J$ вычисляют по формуле

$$\eta_J = \begin{cases} 0, \text{ если } T_{отж} < 370\ °C \\ 0{,}3, \text{ если } T_{отж} > 540\ °C \\ 0{,}15, \text{ если } 370\ °C \le T_{отж} \le 540\ °C \text{ и } J_C^{20}(F_{отж}) \ge 65\ Н/мм \\ -0{,}3, \text{ если } 370\ °C \le T_{отж} \le 540\ °C \text{ и } J_C^{20}(F_{отж}) < 65\ Н/мм \end{cases}, \quad (Л.4)$$

где $T_{отж}$ — максимальная температура МН оценки $J_C^{20}(F)$ в случае, если $J_C^{20}(F_{отж}) > 65$ Н/мм, допускается МН, прошедший отжиг, рассматривать как МН, не прошедший отжиг, и использовать для него формулу (Л1) независимо от значения $F_{отж}$.

### Л.3 Критическое значение $J$-интеграла $J_C(T, F)$

Значение $J_C$ от флюенса нейтронов $F$ при $T > 20$ °С вычисляют по формуле

$$J_C(T,F) = J_C^{20}(F)\frac{R_{p0,2}(T,F)}{R_{p0,2}(20,F)}, \quad (Л.5)$$

где $J_C^{20}(F)$ вычисляют по формулам (Л.1) и (Л.2), а предел текучести $R_{p0,2}(T, F)$ приведен в приложении Н.

### Л.4 Расчет $J_R$-кривых

$J_R$-кривые для МН для заданной температуры $T$ и флюенса нейтронов $F$ вычисляют по формуле

$$J_R(\Delta a_{\text{вяз}}) = q \cdot (\Delta a_{\text{вяз}})^{0,5}, \quad (Л.6)$$

где $\Delta a_{\text{вяз}}$ — вязкий подрост трещины.

Величину $q$ вычисляют по формуле

$$q(T,F) = J_C(T,F) \cdot \left( \frac{J_C(T,F)}{2R_{p0,2}(T,F)} + 0,2 \text{ мм} \right)^{-0,5}, \quad (Л.7)$$

где $J_C(T, F)$ вычисляют по формуле (Л.5), а предел текучести $R_{p0,2}(T, F)$ приведен в приложении Н.

### Л.5 Значение параметра $J_C^{\text{ск}}$

Численное значение параметра $J_C^{\text{ск}}$, которое представляет собой минимальное значение $J_C$ при температуре $T$ = 20 °С, при котором отсутствуют хрупкие проскоки трещины в наплавке, принимают равным

$$J_C^{\text{ск}} = 65 \text{ Н/мм}. \quad (Л.8)$$

В формулах настоящего приложения $J_C$, $J_C^{20}$, $J_C^{\text{ск}}$, $J_R$ в Н/мм, $R_{p0,2}$ в МПа, $T$ в °С, $F$ в 1/м$^2$, $\Delta a_{\text{вяз}}$ в мм.

Формулы настоящего приложения могут быть использованы при температуре $T \le 350$ °С и флюенсе нейтронов $F \le 3,0 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$.

Примечание — При расчетах по формулам настоящего приложения для облучаемых областей КР, не прошедших отжиг, а также для неотжигаемых КР отсчет флюенса нейтронов $F$ начинают с начала ввода в эксплуатацию КР, а для облучаемых областей, прошедших отжиг, отсчет флюенса нейтронов $F$ начинают с момента начала эксплуатации КР после отжига.

## Приложение М
## (справочное)

## Расчет коэффициентов интенсивности напряжений

Для цилиндрических оболочек с трещинами при произвольном распределении упругих напряжений по толщине стенки КР допускается использовать процедуру определения КИН, представленную ниже.

При определении КИН следует соблюдать следующие правила.

М.1 Линейная механика разрушения применима, если выполняется условие

$$\sigma^{H}_{eff} \le 0{,}8 \cdot R_{p0,2}(T, F), \tag{М.1}$$

где $R_{p0,2}(T, F)$ — предел текучести при температуре $T$ и флюенсе нейтронов $F$, значение которого рекомендуется определять по приложению Н;

$\sigma^{H}_{eff}$ — эффективные нетто-напряжения.

Значение $\sigma^{H}_{eff}$ вычисляют следующим образом:

- вычисляют КИН при неоднородном распределении напряжений, $K_I^*$.
- вычисляют эффективные брутто напряжения, равномерно распределенные по толщине стенки КР, $\sigma_{eff}$, используя соотношение

$$K_I(\sigma_{eff}) = K_I^*, \tag{М.2}$$

где $K_I(\sigma_{eff})$ — КИН, рассчитанный в предположении об однородном распределении напряжений $\sigma = \sigma_{eff}$ по толщине стенки КР.

Эффективные нетто напряжения $\sigma^{H}_{eff}$ вычисляют по формуле

$$\sigma^{H}_{eff} = \sigma_{eff} / k_F /. \tag{М.3}$$

М.2 Коэффициент $k_F$ в формуле (М.3) вычисляют в зависимости от типа расчетной трещины:

- для поверхностной трещины

$$k_F = 1 - \frac{a / (S_{KP} + S_H)}{1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{a / c}{a / (S_{KP} + S_H)} \left(1 - \frac{a}{S_{KP} + S_H}\right)^{0,1}}; \tag{М.4}$$

- для поднаплавочной трещины

$$k_F = 1 - \frac{a / (a + 2S_H)}{1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{a / c}{a / (S_{KP} + S_H)} \left(1 - \frac{a}{a + 2S_H}\right)^{0,1}}, \tag{М.5}$$

где $S_{KP}$ — толщина стенки КР без учета антикоррозионной наплавки;

$S_H$ — толщина антикоррозионной наплавки;

$a$ и $c$ — размеры малой и большой полуосей полуэллиптической трещины соответственно.

М.3 Если условие (М.1) не выполняется, то КИН вычисляют в рамках нелинейной механики разрушения с использованием $J$-интеграла.

М.4 Если условие (М.1) выполняется, то допускается проводить расчет КИН в расчетных точках $C$ и $D$ поверхностной полуэллиптической трещины при произвольном распределении напряжений по толщине стенки (рисунок М.1) по следующей процедуре:

М.4.1 Вычисляют координату $X_j = a \cdot j/20$, где $j = 0, 1, 2, \ldots, 20$.

М.4.2 В каждой $j$-й точке с координатой $X_j$ (рисунок М.1) определяют напряжение

$$\sigma_j = \sigma_z(X = X_j). \tag{М.6}$$

М.4.3 Значения приведенных напряжений $S_C$ в точке $C$ и $S_D$ в точке $D$ вычисляют по формулам:

$$S_C = \sum_{j=0}^{20} \left[C_j + (a / c) D_j + \lambda E_j\right] \sigma_j, \tag{М.7}$$

$$S_D = \sum_{j=0}^{20} F_j \sigma_j, \tag{М.8}$$

$$\lambda = a[1 - 1{,}9(a/c)^{0,75} + 0{,}9(a/c)^{1,5}]/(S_{KP} + S_H), \tag{М.9}$$

где $C_j$, $D_j$, $E_j$, $F_j$ — коэффициенты, определяемые по таблице М.1;

$a$ и $c$ — размеры малой и большой полуоси полуэллиптической трещины, соответственно ($a \le c$, $a \le 0{,}7(S_{КР} + S_Н)$);

$S_{КР}$ — толщина стенки;

$S_Н$ — толщина наплавки.

М.4.4 КИН вычисляют по формуле

$$K_I = S_{пр} \cdot Y \cdot \sqrt{a}, \tag{М.10}$$

где $S_{пр}$ — приведенное напряжение в точках $C$ и $D$, вычисляют по формулам (М.7) и (М.8), соответственно;

$Y$ — коэффициент формы трещины, который вычисляют по формуле

$$Y = \frac{\gamma \cdot \sqrt{\pi / (1 + 1{,}464(a/c)^{1{,}65})}}{[1 - (0{,}89 - 0{,}57\sqrt{a/c})^3 \cdot (a/(S + S_Н))^{1{,}5}]^{3{,}25}} \tag{М.11}$$

Таблица М.1 — Значения коэффициентов $C_j$, $D_j$, $E_j$, $F_j$

| $j$ | $C_j$ | $D_j$ | $E_j$ | $F_j$ |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0,0189 | –0,0085 | 0,0278 | 0,270 |
| 1 | 0,0373 | –0,0165 | 0,0548 | 0,198 |
| 2 | 0,037 | –0,0160 | 0,0510 | 0,112 |
| 3 | 0,0368 | –0,0155 | 0,0472 | 0,080 |
| 4 | 0,0367 | –0,0149 | 0,0431 | 0,062 |
| 5 | 0,0366 | –0,0142 | 0,0390 | 0,050 |
| 6 | 0,0367 | –0,0134 | 0,0347 | 0,041 |
| 7 | 0,0368 | –0,0125 | 0,0303 | 0,035 |
| 8 | 0,0371 | –0,0115 | 0,0257 | 0,029 |
| 9 | 0,0376 | –0,0105 | 0,0207 | 0,025 |
| 10 | 0,0382 | –0,0093 | 0,0155 | 0,021 |
| 11 | 0,0391 | –0,0080 | 0,0100 | 0,018 |
| 12 | 0,0402 | –0,0063 | 0,0042 | 0,015 |
| 13 | 0,0418 | –0,0045 | –0,0023 | 0,012 |
| 14 | 0,0438 | –0,0020 | –0,0094 | 0,010 |
| 15 | 0,0466 | 0,0010 | –0,0175 | 0,008 |
| 16 | 0,0507 | 0,0051 | –0,0273 | 0,006 |
| 17 | 0,0571 | 0,0108 | –0,0405 | 0,004 |
| 18 | 0,0685 | 0,0209 | –0,0595 | 0,003 |
| 19 | 0,1022 | 0,0477 | –0,0948 | 0,001 |
| 20 | 0,1203 | 0,0781 | –0,1527 | 0,000 |

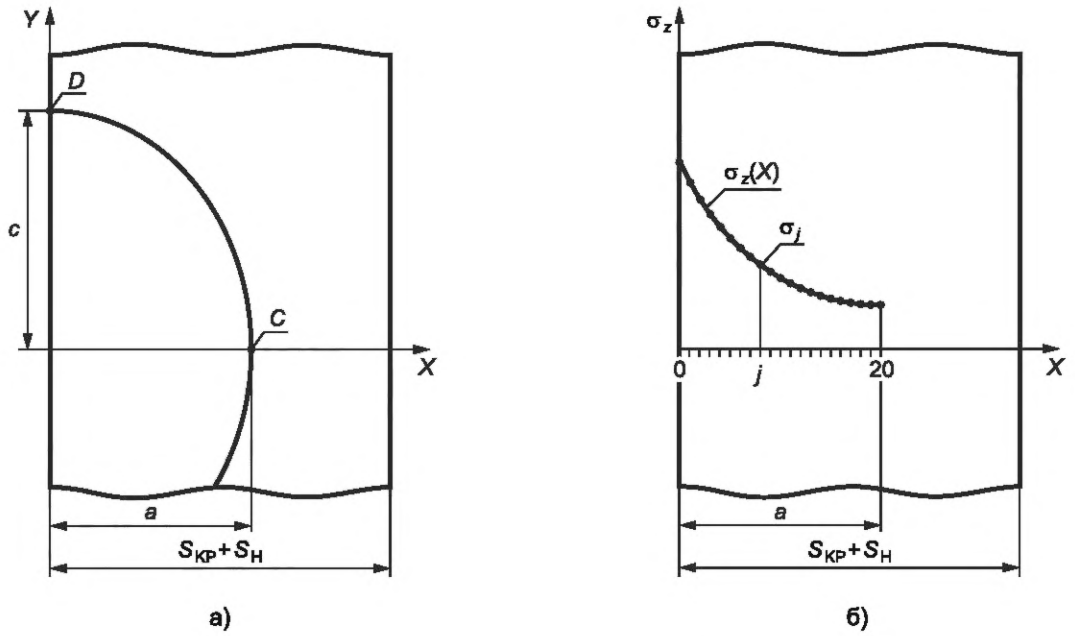
М.4.5 Коэффициент $\gamma$ для точек $C$ и $D$ (см. рисунок М.1) вычисляют по формулам (М.12) и (М.13):

- для точки $C$:

$$\gamma_C = 1{,}12 - 0{,}08a/c; \tag{М.12}$$

- для точки $D$:

$$\gamma_D = \left[1{,}0 + 0{,}32\left(a/\left(S_{КР} + S_Н\right)\right)^2\right]\left(1{,}23 - 0{,}09a/c\right)\sqrt{a/c}. \tag{М.13}$$




*C*, *D* — расчетные точки; *a*, *c* — малая и большая полуоси расчетного дефекта; $S_{КР}$ — толщина стенки КР без наплавки; $S_Н$ — толщина наплавки

Рисунок М.1 — Схематизация поверхностной полуэллиптической трещины а) и распределение напряжений по оси *X* в теле без дефекта б)

## Приложение Н
## (справочное)

## Механические и теплофизические свойства материалов

### Н.1 Предел текучести

Н.1.1 Зависимость предела текучести ОМ и МШ от флюенса нейтронов и температуры $R_{p0,2}(T, F)$, МПа, вычисляют по формуле

$$R_{p0,2}(T, F) = R_{p0,2}(20, F) + 993 \cdot \exp[-8{,}74 \cdot 10^{-3}(T + 273)] - 77, \quad (Н.1)$$

где $R_{p0,2}(20, F)$, МПа, вычисляют по формулам:

- для необлучаемых областей

$$R_{p0,2}(20, F) = R_{p0,2}(20{,}0) + 1{,}85 \cdot \Delta T_T; \quad (Н.2)$$

- для облучаемых областей, не прошедших отжиг

$$R_{p0,2}(20, F) = R_{p0,2}(20{,}0) + 1{,}85 \cdot (\Delta T_F + \Delta T_T); \quad (Н.3)$$

- для облучаемых областей, прошедших отжиг

$$R_{p0,2}(20, F) = R_{p0,2}(20{,}0) + 1{,}85 \cdot (\Delta T_F + \Delta T_T + T_{кВ} - T_{к0}), \quad (Н.4)$$

где $R_{p0,2}(20, 0)$ — значение предела текучести материала в исходном состоянии при $F = 0$ и $T = 20$ °С, МПа;

$T_{к0}$ — критическая температура хрупкости ОМ и МШ в исходном состоянии, °С;

$T_{кВ}$ — критическая температура хрупкости облученного ОМ и МШ на момент начала эксплуатации после отжига, °С.

Значения $\Delta T_F$ и $\Delta T_T$ определяют в соответствии с приложениями Б, В, Г, Д и Ж.

Допускается определять зависимость предела текучести ОМ и МШ от температуры $R_{p0,2}(T)$ для заданного значения флюенса нейтронов на основании результатов испытаний образцов свидетелей. При этом должно быть испытано не менее чем по три образца при трех температурах, отличающихся друг от друга не менее чем на 50 °С, и использован вид зависимости (Н.1).

Н.1.2 Зависимость предела текучести МН от флюенса нейтронов и температуры $R_{p0,2}(T, F)$, МПа, записывают в виде

$$R_{p0,2}(T, F) = R_{p0,2}(20, F) + 500 \cdot \exp[-3{,}43 \cdot 10^{-3}(T + 273)] - 180, \quad (Н.5)$$

где $R_{p0,2}(20, F)$, МПа, вычисляют по формулам:

- для необлучаемых областей и облучаемых областей, не прошедших отжиг,

$$R_{p0,2}(20,F) = R_{p0,2}(20, 0) + 36{,}7 \cdot \left(\frac{F}{F_0}\right)^{0,27}; \quad (Н.6)$$

- для облучаемых областей, прошедших отжиг,

$$R_{p0,2}(20,F) = R_{p0,2}(20, 0) + 36{,}7 \cdot \left[\left(\frac{R_{p0,2}^{вост} - R_{p0,2}(20,0)}{36{,}7}\right)^{1/0,27} + \frac{F}{F_0}\right]^{0,27}, \quad (Н.7)$$

где $R_{p0,2}(20,0)$ — значение предела текучести МН при 20 °С в исходном (необлученном) состоянии;

$R_{p0,2}^{вост}$ — значение предела текучести МН при $T = 20$ °С на момент начала эксплуатации после отжига.

Для МН допускается принимать $R_{p0,2}(20, 0) = 413$ МПа.

При расчете минимальных значений предела текучести МН в расчетах НДС и $J$-интеграла в формуле (Н.5) допускается в качестве значения $R_{p0,2}(20, F)$ принимать $R_{p0,2}(20{,}0)$.

В формуле (Н.7) $R_{p0,2}^{вост}$, МПа, вычисляют по формуле

$$R_{p0,2}^{вост} = R_{p0,2}(20, F_{отж}) - \eta_{Rp}^{МН} \cdot \left[R_{p0,2}(20, F_{отж}) - R_{p0,2}(20{,}0)\right], \quad (Н.8)$$

где $\eta_{Rp}^{МН}$ — коэффициент восстановления предела текучести МН, определяемый согласно Н.4;

$R_{p0,2}(20, F_{отж})$ — значение предела текучести МН при 20 °С в облученном состоянии при флюенсе нейтронов на момент проведения отжига $F_{отж}$, которое вычисляют по формуле (Н.6).

Примечание — При расчетах $R_{p0,2}(T, F)$ для облучаемых областей, не прошедших отжиг, отсчет флюенса нейтронов $F$ начинают с начала ввода в эксплуатацию КР. При расчетах $R_{p0,2}(T, F)$ для облучаемых областей, прошедших отжиг, отсчет флюенса нейтронов $F$ начинают с момента начала эксплуатации КР после отжига.

### Н.2 Диаграмма деформирования

При решении МКЭ упругопластической задачи используют диаграммы деформирования материала, которые зависят от $\varepsilon^p_{eq}$, $F$ и $T$, а условие текучести записывают в виде

$$\sigma_{eq} = \Phi(\varepsilon^p_{eq}, F, T), \quad (Н.9)$$

где $\sigma_{eq}$ — интенсивность напряжений;

$\Phi(\varepsilon^p_{eq}, F, T)$ — функция, описывающая поверхность текучести;

$\varepsilon^p_{eq}$ — интенсивность пластической деформации.

Диаграмма пластического деформирования ОМ и МШ при флюенсе нейтронов $F$ и температуре $T$ записывают в виде

$$\Phi(\varepsilon^p_{eq}, F, T) = R_{p0,2}(T, F) + A \cdot (\varepsilon^p_{eq})^m, \quad (Н.10)$$

где $A$ и $m$ — параметры материала, описывающие деформационное упрочнение;

$R_{p0,2}(T, F)$ — предел текучести, определяемый по формуле (Н.1) для ОМ и МШ, и по формуле (Н.5) для МН.

Для ОМ и МШ параметры деформационного упрочнения $A$ и $m$ для диапазона температур от 20 °С до 565 °С принимают по таблице Н.1.

Допускается для МН принимать параметры $A$ и $m$ в формуле (Н.10) для диапазона температур от 20 °С до 565 °С по таблице Н.2.

Таблица Н.1 — Параметры диаграммы деформирования $A$ и $m$ для ОМ и МШ

| Параметр | Температура, °С | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 100 | 200 | 350 | 565 |
| $A$, МПа | 590 | 557 | 543 | 537 | 205 |
| $m$ | 0,49 | 0,49 | 0,50 | 0,50 | 0,58 |

Таблица Н.2 — Параметры диаграммы деформирования $A$ и $m$ для МН

| Флюенс нейтронов $F$, 1/м$^2$ | Параметр | Температура, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 100 | 200 | 350 | 400 | 500 | 565 |
| 0 | $A$, МПа | 840 | 610 | 477 | 406 | 397 | 387 | 384 |
| | $m$ | 0,51 | 0,54 | 0,50 | 0,41 | 0,38 | 0,34 | 0,32 |
| $1 \cdot 10^{22}$ | $A$, МПа | 818 | 588 | 455 | 384 | 375 | 365 | 362 |
| | $m$ | 0,51 | 0,54 | 0,51 | 0,42 | 0,39 | 0,35 | 0,33 |
| $3 \cdot 10^{23}$ | $A$, МПа | 785 | 555 | 422 | 351 | 342 | 332 | 329 |
| | $m$ | 0,52 | 0,58 | 0,56 | 0,46 | 0,43 | 0,38 | 0,36 |
| $6 \cdot 10^{23}$ | $A$, МПа | 773 | 544 | 410 | 340 | 331 | 321 | 318 |
| | $m$ | 0,53 | 0,59 | 0,58 | 0,48 | 0,46 | 0,40 | 0,38 |
| от $9 \cdot 10^{23}$ до $3 \cdot 10^{24}$ | $A$, МПа | 766 | 536 | 403 | 332 | 323 | 313 | 310 |
| | $m$ | 0,54 | 0,60 | 0,60 | 0,50 | 0,47 | 0,42 | 0,39 |

### Н.3 Уравнение ползучести (в процессе отжига) для основного металла и металла шва

При решении МКЭ вязкоупругопластической задачи для расчета НДС КР в процессе отжига уравнение ползучести для ОМ и МШ записывают в виде

$$\xi^c_{eq} = f(\sigma_{eq}, \varepsilon^c_{eq}, T), \quad (Н.11)$$

где $\xi^c_{eq}$ — интенсивность скорости деформации ползучести;

$\sigma_{eq}$ — интенсивность напряжений;

$\varepsilon^c_{eq}$ — интенсивность деформации ползучести.

Для ОМ и МШ $\xi^c_{eq}$, ч$^{-1}$ для заданной температуры $T$ вычисляют по формуле

$$\xi_{eq}^{c} = \frac{2(1+\nu)}{3E} k \cdot p \cdot \sigma_{eq} \left[ \frac{1}{k} \ln\left( 1 + \frac{3E\varepsilon_{eq}^{c}}{2(1+\nu)\sigma_{eq}} \right) \right]^{\frac{p-1}{p}}, \quad (Н.12)$$

где $\nu$ — коэффициент Пуассона;

$E$ — модуль упругости;

$k$ и $p$ — константы материала.

При $T = T_{отж}$ = (565 ± 15) °С для ОМ КР ВВЭР-1000 допускается принимать $k$ = 0,18 и $p$ = 0,25, для МШ — $k$ = 0,40 и $p$ = 0,25.

При $T = T_{отж}$ = (475 ± 15) °С для ОМ и МШ КР ВВЭР-440 допускается принимать $k$ = 0,056 и $p$ = 0,26.

**Н.4 Расчет изменения предела текучести в процессе отжига для основного металла и металла шва**

Изменение предела текучести металла в процессе отжига при температуре $T_{отж}$ (см. рисунок Н.1) описывают следующими зависимостями

$$R_{p0,2}(\tau) = \begin{cases} R_{p0,2}^{обл} \cdot \exp(-\alpha_{an} \cdot \tau) \text{ при } \tau \le \tau^{*} \\ R_{p0,2}^{вост} \text{ при } \tau > \tau^{*} \end{cases}, \quad (Н.13)$$

где $\tau$ — время в процессе отжига, ч;

$\alpha_{an} = \frac{1}{\tau^{*}} \cdot \ln\left( R_{p0,2}^{обл} / R_{p0,2}^{вост} \right)$, $\tau^{*}$ = 100 ч;

$R_{p0,2}^{обл}$ — значение предела текучести облученного металла на момент начала тепловой выдержки при $T = T_{отж}$;

$R_{p0,2}^{вост}$ — значение предела текучести в конце тепловой выдержки (восстановленное значение) при $T = T_{отж}$.

Значение $R_{p0,2}^{обл}$ при $T_{отж}$ на момент начала отжига вычисляют по формуле (Н.1) для ОМ и МШ, и по формуле (Н.5) для МН. При этом для ОМ, МШ и МН принимают соответствующий флюенс нейтронов на момент проведения отжига $F_{отж}$ (см. рисунок Н.1).

Значение предела текучести после отжига $R_{p0,2}^{вост}$ при $T_{отж}$ вычисляют по формуле

$$R_{p0,2}^{вост} = R_{p0,2}^{обл} - \eta_{Rp} \cdot (R_{p0,2}^{обл} - R_{p0,2}^{исх}), \quad (Н.14)$$

где $\eta_{Rp}$ — коэффициент восстановления предела текучести;

$R_{p0,2}^{исх}$ — значение предела текучести в исходном (необлученном) состоянии при $T_{отж}$.

Для ОМ и МШ коэффициент восстановления предела текучести $\eta_{Rp}^{ОМ}$ в зависимости от температуры $T_{отж}$, при которой находится металл в процессе отжига, допускается вычислять по формуле

$$\eta_{Rp}^{ОМ} = 0,5 + 0,5 \cdot \tanh\left[ (T_{отж} - 450)/40 \right]. \quad (Н.15)$$

Для МН коэффициент восстановления предела текучести $\eta_{Rp}^{МН}$ в зависимости от температуры $T_{отж}$, при которой находится МН в процессе отжига, допускается вычислять по формуле

$$\eta_{Rp}^{МН} = \begin{cases} 0 \text{ при } T_{отж} \le 290 \text{ °С} \\ 0,85 \dfrac{T_{отж} - 290}{475 - 290} \text{ при } 290 \text{ °С} < T_{отж} < 475 \text{ °С} \\ 0,85 \text{ при } T_{отж} \ge 475 \text{ °С} \end{cases}. \quad (Н.16)$$

Формула (Н.14) может быть использована для любой температуры $T_{отж}$ при условии, что параметры $R_{p0,2}^{исх}$, $R_{p0,2}^{обл}$ и $R_{p0,2}^{вост}$, входящие в (Н.14), отвечают одной и той же температуре $T_{отж}$.

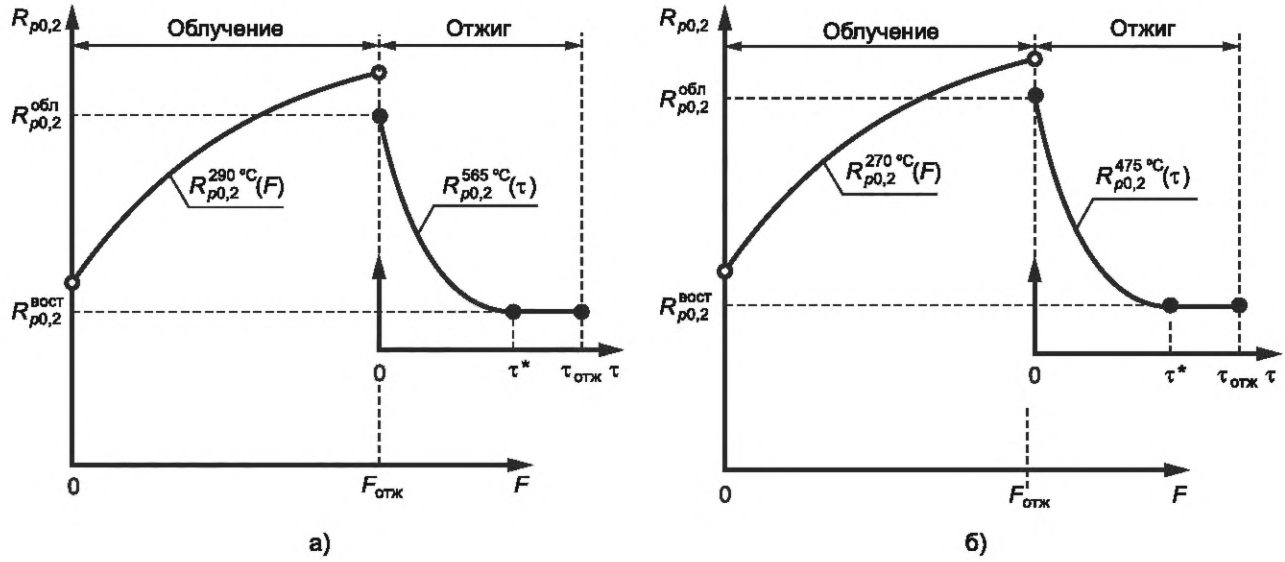



Рисунок Н.1 — Схема изменения предела текучести $R_{p0,2}$ материала КР ВВЭР-1000 а) и КР ВВЭР-440 б) при облучении и отжиге

### Н.5 Теплофизические свойства материалов

Значения модуля упругости $E$, коэффициентов линейного расширения $\alpha$, теплопроводности $\lambda$, температуропроводности $a$ и удельной теплоемкости $c_p$, при различных температурах для ОМ и МШ представлены в таблице Н.3, а для МН в таблице Н.4.

Таблица Н.3 — Физические свойства для ОМ и МШ

| Параметр | Температура, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 565 |
| $E \cdot 10^{-5}$, МПа | 2,05 | 2,01 | 1,96 | 1,90 | 1,84 | 1,77 | 1,74 |
| $\alpha \cdot 10^5$, 1/°С | 1,10 | 1,15 | 1,20 | 1,25 | 1,30 | 1,35 | 1,37 |
| $\lambda$, Вт/(м · °С) | 38,0 | 37,6 | 37,0 | 36,1 | 35,0 | 33,6 | 32,5 |
| $a \cdot 10^6$, м$^2$/с | 10,0 | 9,6 | 9,0 | 8,3 | 7,5 | 6,6 | 6,0 |
| $c_p$, Дж/(кг · °С) | 485 | 501 | 528 | 561 | 605 | 664 | 736 |

Таблица Н.4 — Физические свойства для МН

| Параметр | Температура, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 565 |
| $E \cdot 10^{-5}$, МПа | 1,88 | 1,83 | 1,77 | 1,71 | 1,64 | 1,57 | 1,53 |
| $\alpha \cdot 10^5$, 1/°С | 1,57 | 1,61 | 1,66 | 1,71 | 1,75 | 1,79 | 1,81 |
| $\lambda$, Вт/(м · °С) | 14,5 | 16,2 | 18,2 | 20,2 | 22,0 | 23,6 | 24,2 |
| $a \cdot 10^6$, м$^2$/с | 4,0 | 4,2 | 4,45 | 4,7 | 4,95 | 5,2 | 5,3 |
| $c_p$, Дж/(кг · °С) | 460 | 491 | 523 | 552 | 574 | 591 | 605 |

**Приложение П**
**(обязательное)**

## Определение размера контура интегрирования

При численных расчетах $J$-интеграла с помощью МКЭ, с целью получения консервативных и адекватных значений $J$-интеграла, размер контура интегрирования $r_C$ (см. рисунок П.1) должен быть больше или равен значению допускаемого размера контура интегрирования $[r_C]$

$$r_C \geq [r_C]. \qquad (П.1)$$

Примечания

1 Для режимов эксплуатации КР, таких как НУЭ и ГИ, материал у вершины трещины подвергается монотонному упругопластическому нагружению. Для этих режимов величина контура интегрирования должна удовлетворять условию (П.1), так как $J$-интеграл для такого нагружения инвариантен к размеру контура интегрирования при его размере, превышающем величину зоны влияния притупления вершины трещины.

2 Для режимов эксплуатации КР, таких как ННУЭ, ПА, ПЗ, МРЗ и их сочетаний, материал у вершины трещины подвергается неизотермическому немонотонному упругопластическому нагружению. Для такого нагружения уменьшение контура интегрирования приводит к уменьшению рассчитываемого значения $J$-интеграла.

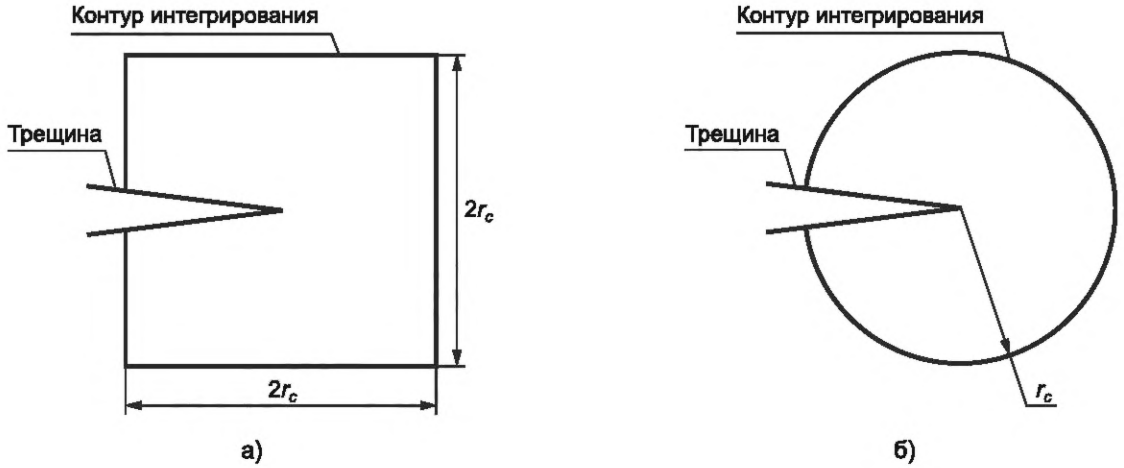



Рисунок П.1 — Типовой контур интегрирования «прямоугольного» типа а) и «кругового типа» б) для расчета $J$-интеграла

Значение допускаемого размера контура интегрирования $[r_C]$, мм, в зависимости от величины КИН $K_J$, реализуемой в рассматриваемом режиме эксплуатации, вычисляют по формуле

$$[r_C] = \begin{cases} 3{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot (K_J)^{1{,}51} + 0{,}05 \ \text{ при } K_J \geq 40 \ \text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}} \\ 0{,}15 \ \text{ при } K_J < 40 \ \text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}} \end{cases}. \qquad (П.2)$$

Зависимость $[r_C]$ от $K_J$, рассчитанная по формуле (П.2), представлена на рисунке П.2.

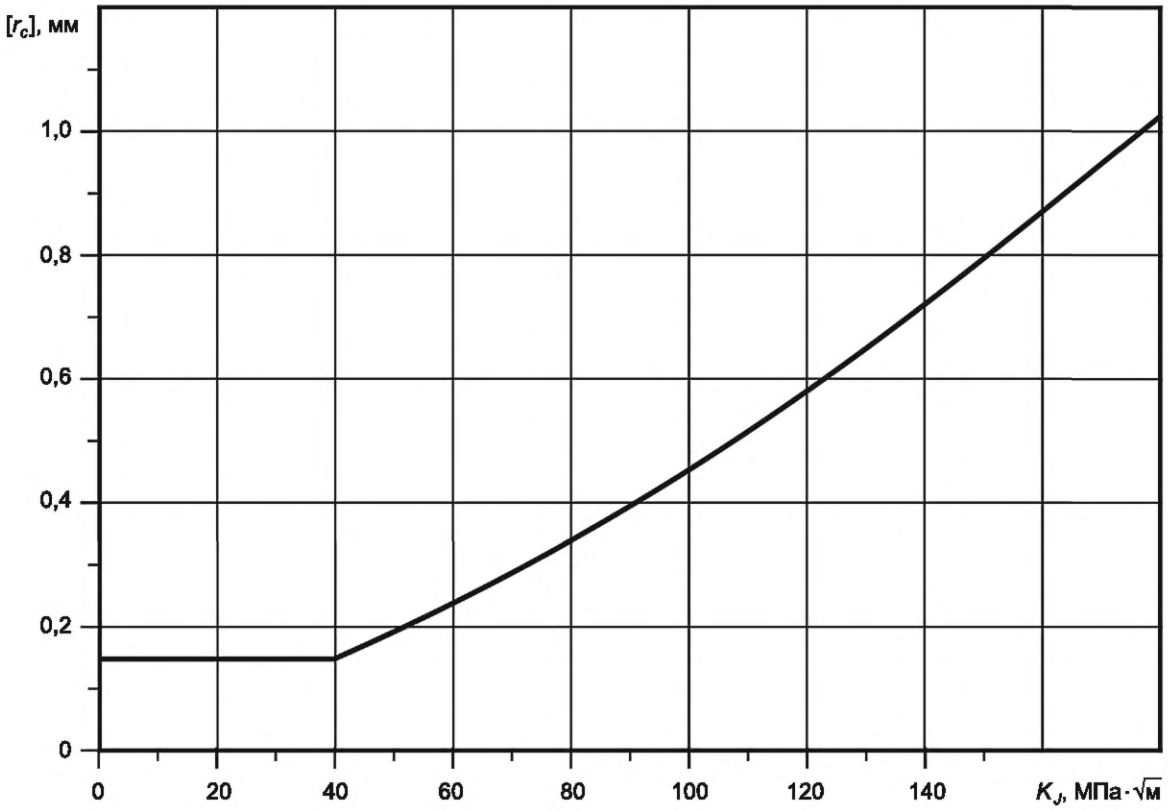



Рисунок П.2 — Зависимость допускаемого размера контура интегрирования [$r_c$] от величины $K_J$

## Приложение Р
## (справочное)

## Остаточные напряжения

### Р.1 Распределение остаточных напряжений для корпусов реакторов типа ВВЭР с антикоррозионной наплавкой

Р.1.1 Распределение ОН в КР в зависимости от температуры и времени выдержки при послесварочном отпуске допускается определять в соответствии с эпюрами и зависимостями, приведенными в Р.1.2 и Р.1.3. Дополнительно необходимо учесть перераспределение ОН в процессе сдаточных ГИ на заводе изготовителе по процедуре, изложенной в Р.1.4.

При необходимости уточненной информации по распределению ОН и деформаций, проводят расчет с помощью решения МКЭ температурной задачи и упруго вязкопластической задачи при неизотермическом нагружении.

Р.1.2 Распределение остаточных сварочных напряжений вне зоны сварного шва

Распределение ОН $\sigma_{ост}$ по нормали $N$ к поверхности рассматриваемого элемента КР (см. рисунок Р.1), вызванных наплавкой и послесварочным отпуском, представлены на рисунке Р.2. ОН $(\sigma_{zz})_{ост}$ в наплавке, а также в зоне ОМ, примыкающего к наплавке (размер зоны $2S_н$) принимают равными напряжениям $(\sigma_{xx})_{ост}$:

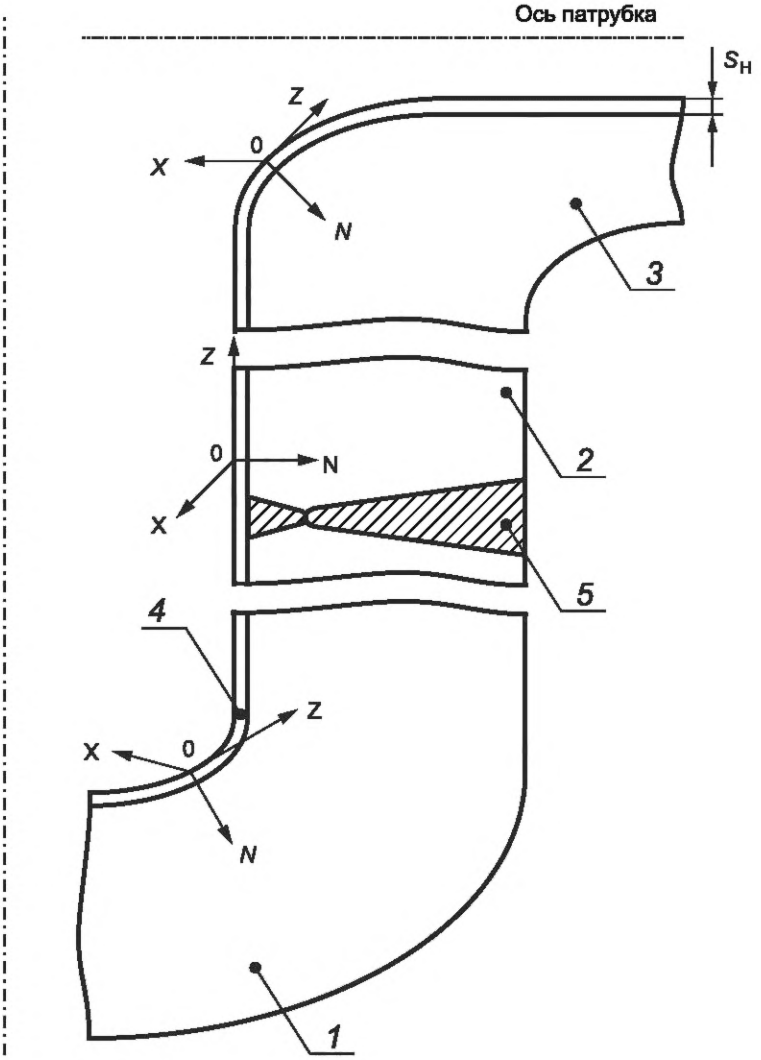
$$(\sigma_{zz})^{н}_{ост} = (\sigma_{xx})^{н}_{ост} = \sigma^{н}_{ост},$$

$$(\sigma_{zz})^{ОМ}_{ост} = (\sigma_{xx})^{ОМ}_{ост} = \sigma^{ОМ}_{ост},$$

где $\sigma^{н}_{ост}$ и $\sigma^{ОМ}_{ост}$ — ОН в наплавке и ОМ соответственно.

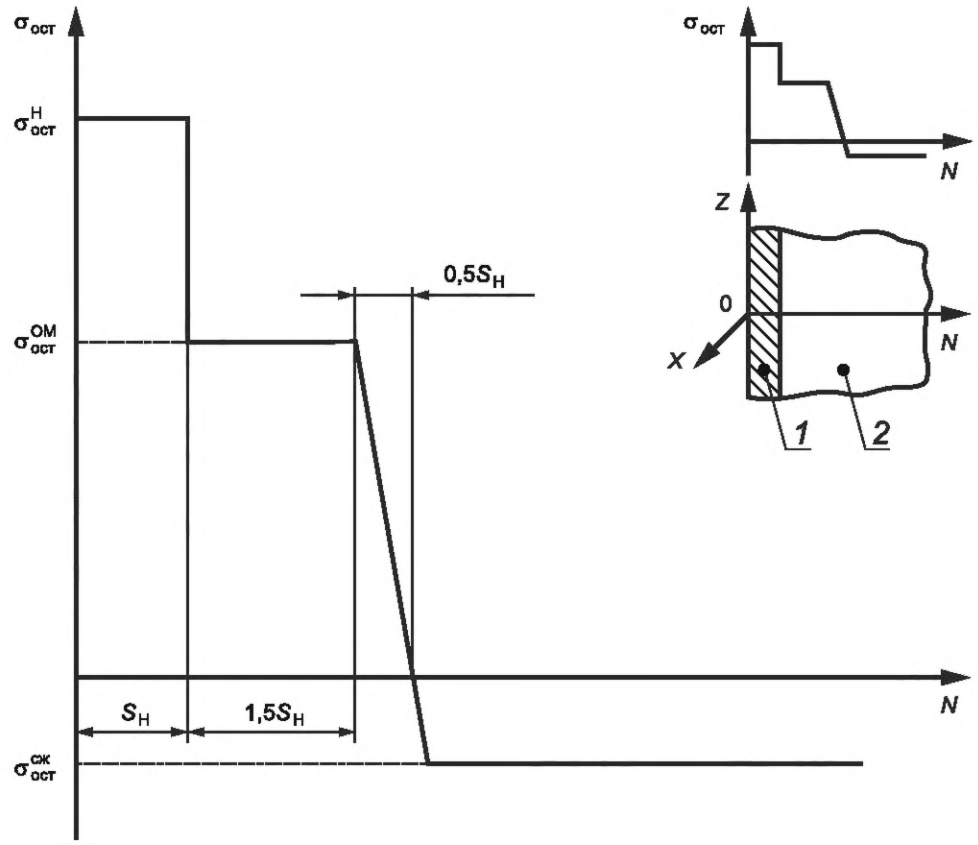
Величину ОН в зависимости от продолжительности отпуска определяют по номограмме, представленной на рисунке Р.3.

Сжимающие ОН $\sigma^{сж}_{ост}$ (см. рисунок Р.2) вычисляют на основании условий равновесия.



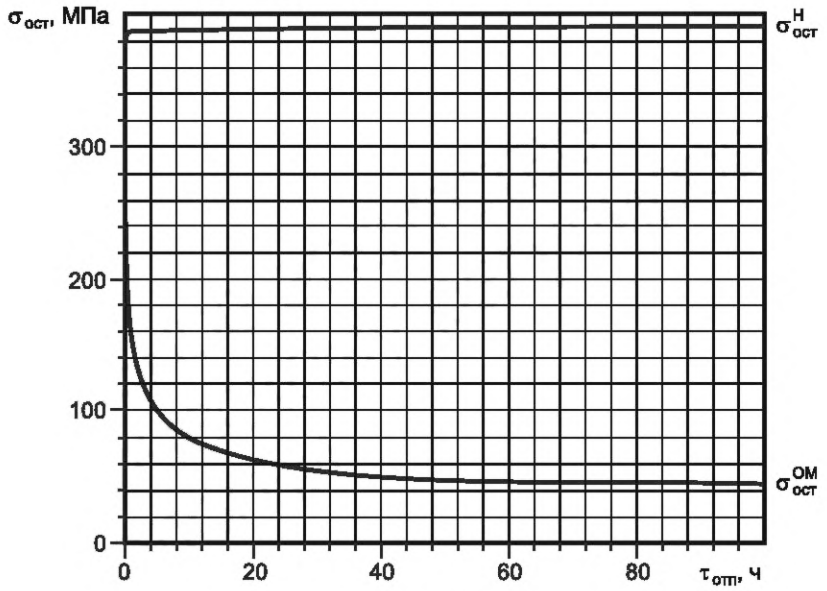

*1* — днище; *2* — цилиндрическая часть КР; *3* — патрубок; *4* — антикоррозионная наплавка; *5* — кольцевой сварной шов; *N* — нормаль к поверхности рассматриваемого элемента КР; *Z* — касательная к образующей рассматриваемого элемента КР; $S_H$ — толщина наплавки

Рисунок Р.1 — Расположение локальных декартовых систем координат (*Z*, *X*, *N*) в различных элементах КР (начало координат на внутренней поверхности КР)

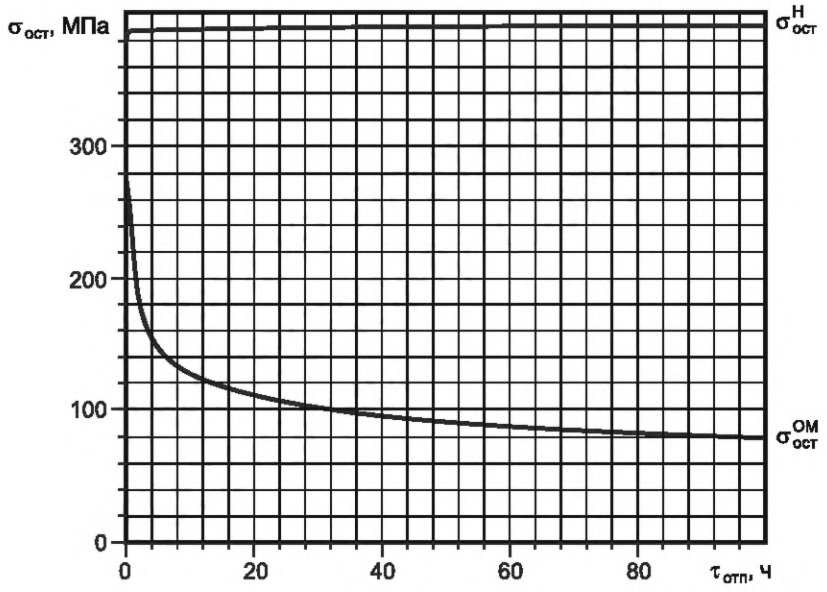



*1* — антикоррозионная наплавка; *2* — основной металл; $S_Н$ — толщина наплавки; (*Z*, *X*, *N*) — локальная декартовая система координат; *N* — нормаль к поверхности элемента КР; *Z* — касательная к образующей элемента КР

Рисунок Р.2 — Схема распределения остаточных напряжений в элементе КР (вне зоны сварного шва), вызванных наплавкой и послесварочным отпуском




а) $T_{отп}$=670° С




б) $T_{отп}$=650° С

Рисунок Р.3 — Зависимость остаточных напряжений $\sigma^{Н}_{ост}$ и $\sigma^{ОМ}_{ост}$ в КР от продолжительности отпуска при температуре $T_{отп}$

Р.1.3 Распределение остаточных напряжений в кольцевом сварном шве

Распределение ОН по сечению кольцевого сварного шва (рисунок Р.4) допускается вычислить по формуле

$$\begin{cases} \sigma_{ост}(N) = \sigma^{Н}_{ост} \text{ при } N \le S_{Н} \\ \sigma_{ост}(N) = \sigma^{МШ}_{ост} \text{ при } S_{Н} \le N \le N_0 \\ \sigma_{ост}(N) = \sigma^{МШ}_{ост} \cdot \cos\left(2\pi \cdot \dfrac{N - S_{Н}}{S_{КР}}\right) \text{ при } N > N_0 \end{cases}, \quad (Р.1)$$

где $N_0$ является корнем следующего уравнения

$$\cos\left(2\pi\cdot\frac{N-S_{Н}}{S_{КР}}\right)=1-\frac{2\cdot(N-2{,}5\cdot S_{Н})}{S_{Н}},\qquad (Р.2)$$

где $S_{КР}$ — толщина стенки рассматриваемого элемента КР;

$S_{Н}$ — толщина наплавки;

$N$ — координата по нормали к поверхности рассматриваемого элемента КР (рассматривают систему координат, представленную на рисунке Р.1).

Напряжения $\sigma_{ост}^{МШ}$ принимают равными $\sigma_{ост}^{ОМ}$.

Напряжения $\sigma_{ост}^{ОМ}$ и $\sigma_{ост}^{Н}$ определяют по номограмме, приведенной на рисунке Р.3.

Р.1.4 Остаточные напряжения в МН КР после проведения сдаточных ГИ на заводе-изготовителе.

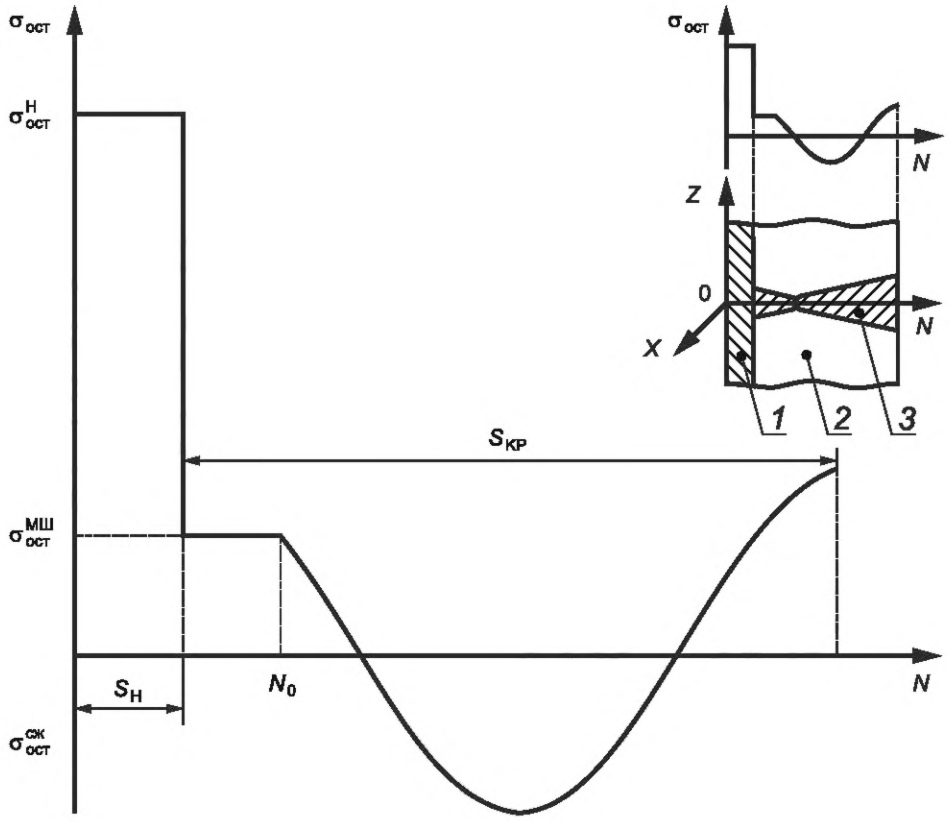
Р.1.4.1 По результатам термоупругого расчета напряжения $\sigma_{xx}^{ГИ}$, МПа, и $\sigma_{zz}^{ГИ}$, МПа, возникающие в наплавке в рассматриваемом элементе КР при ГИ, вычисляют по формулам:

$$\sigma_{xx}^{ГИ}=\sigma_{xx}^{p}+\sigma^{T},\qquad (Р.3)$$

$$\sigma_{zz}^{ГИ}=\sigma_{zz}^{p}+\sigma^{T},\qquad (Р.4)$$

где $\sigma_{xx}^{p}$ и $\sigma_{zz}^{p}$ — напряжения, обусловленные давлением ГИ на прочность $p_{ГИ}$;

$\sigma^{T}$ — напряжения, обусловленные температурными деформациями, вызванными разностью коэффициентов линейного расширения МН и ОМ (МШ) при фактической температуре ГИ на прочность $T_{ГИ}$.




*1* — антикоррозионная наплавка; *2* — основной металл; *3* — кольцевой сварной шов; $S_{Н}$ — толщина наплавки; $S_{КР}$ — толщина стенки элемента КР без наплавки; (*Z*, *X*, *N*) — локальная декартовая система координат; *N* — нормаль к поверхности элемента КР; *Z* — касательная к образующей элемента КР

Рисунок Р.4 — Схема распределения остаточных напряжений по сечению кольцевого сварного шва в элементе КР, вызванных наплавкой и послесварочным отпуском

Расчет напряжений $\sigma_{xx}^{ГИ}$ и $\sigma_{zz}^{ГИ}$ выполняют с использованием температурных зависимостей модуля упругости и коэффициента линейного расширения.

Р.1.4.2 При $\sigma_{xx}^{ГИ} \geq \sigma_{zz}^{ГИ}$ ОН в МН после проведения ГИ вычисляют по формулам:

$$\left(\sigma_{xx}^{ГИ}\right)_{ост} = \left(\sigma_{xx}\right)_{ост}^{н} - \sigma_{xx}^{ГИ}, \quad (Р.5)$$

$$\left(\sigma_{zz}^{ГИ}\right)_{ост} = \left(\sigma_{zz}\right)_{ост}^{н} - \sigma_{zz}^{ГИ} + \Delta\sigma_{zz}^{ГИ}, \quad (Р.6)$$

где величина $\Delta\sigma_{zz}^{ГИ}$ определяют из решения уравнения вида

$$(1-2\nu)\left(\sigma_{zz}^{ГИ}\right)^2 - \left[(2-\nu)\sigma_{xx}^{p} + (1-2\nu)\sigma_{zz}^{p} + 3(1-\nu)\sigma^{T} + (1+\nu)R_{p0,2}^{ГИ}\right]\Delta\sigma_{zz}^{ГИ} - (1+\nu)\left(\sigma_{xx}^{p} - \sigma_{zz}^{p}\right)R_{p0,2}^{ГИ} = 0. \quad (Р.7)$$

Р.1.4.3 При $\sigma_{xx}^{ГИ} < \sigma_{zz}^{ГИ}$ ОН в МН после проведения ГИ вычисляют по формулам:

$$\left(\sigma_{xx}^{ГИ}\right)_{ост} = \left(\sigma_{xx}\right)_{ост}^{н} - \sigma_{xx}^{ГИ} + \Delta\sigma_{xx}^{ГИ}, \quad (Р.8)$$

$$\left(\sigma_{zz}^{ГИ}\right)_{ост} = \left(\sigma_{zz}\right)_{ост}^{н} - \sigma_{zz}^{ГИ}, \quad (Р.9)$$

где $\Delta\sigma_{xx}^{ГИ}$ — величина, определяющаяся из решения уравнения вида

$$(1-2\nu)\left(\Delta\sigma_{xx}^{ГИ}\right)^2 - \left[(2-\nu)\sigma_{zz}^{p} + (1-2\nu)\sigma_{xx}^{p} + 3(1-\nu)\sigma^{T} + (1+\nu)R_{p0,2}^{ГИ}\right]\Delta\sigma_{xx}^{ГИ} - (1+\nu)\left(\sigma_{zz}^{p} - \sigma_{xx}^{p}\right)R_{p0,2}^{ГИ} = 0. \quad (Р.10)$$

Примечания

1 Расчет выполняют в системе координат, приведенной на рисунке Р.1.

2 $(\sigma_{zz}^{ГИ})_{ост} = (\sigma_{xx}^{ГИ})_{ост} = \sigma_{ост}^{Н}$ — ОН в МН, обусловленные наплавкой и отпуском. Величина остаточных напряжений $\sigma_{ост}^{н}$ определяют по номограмме, представленной на рисунке Р.3.

3 $R_{p0,2}^{ГИ}$ — предел текучести МН при температуре ГИ $T_{ГИ}$. Расчет $R_{p0,2}^{ГИ}$ рекомендуется выполнять по формулам приложения Н для МН, где $R_{p0,2}(20,0) = 410$ МПа.

### Р.2 Распределение остаточных напряжений для корпусов реакторов типа ВВЭР без антикоррозионной наплавки

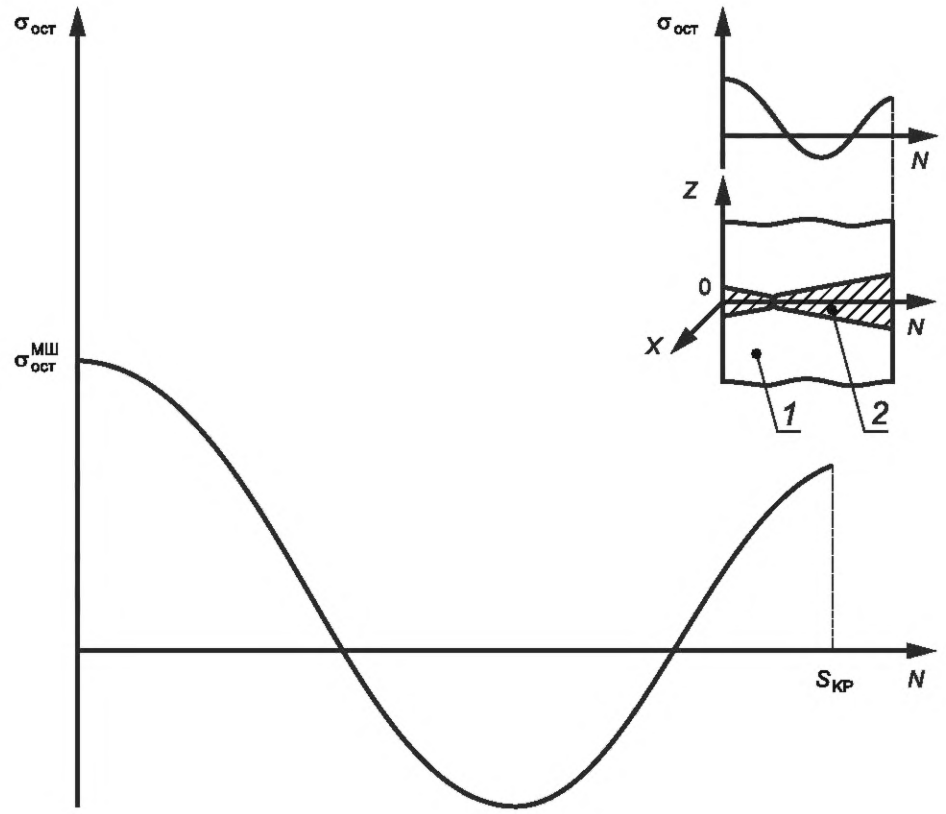
Распределение окружных и осевых ОН, возникающих после сварки и послесварочного отпуска, по толщине кольцевых сварных соединений (рисунок Р.5) вычисляют по формуле

$$\sigma_{ост}(Y) = \sigma_{ост}^{МШ} \cdot \cos\left(2\pi\frac{Y}{S_{КР}}\right), \quad (Р.11)$$

где $S_{КР}$ — толщина стенки рассматриваемого элемента КР;

$Y$ — координата по толщине элемента КР (рассматривают систему координат, представленную на рисунке Р.1).

Значения $\sigma_{ост}^{МШ}$ в формуле (Р.11) с учетом продолжительности отпуска рассматриваемого сварного соединения определяют по номограмме, приведенной на рисунке Р.6.




*1* — основной металл; *2* — кольцевой сварной шов; $S_{КР}$ — толщина стенки элемента КР; (*Z*, *X*, *N*) — локальная декартовая система координат; *N* — нормаль к поверхности элемента КР; *Z* — касательная к образующей элемента КР

Рисунок Р.5 — Схема распределения остаточных напряжений по сечению кольцевого сварного шва в элементе КР, вызванных послесварочным отпуском

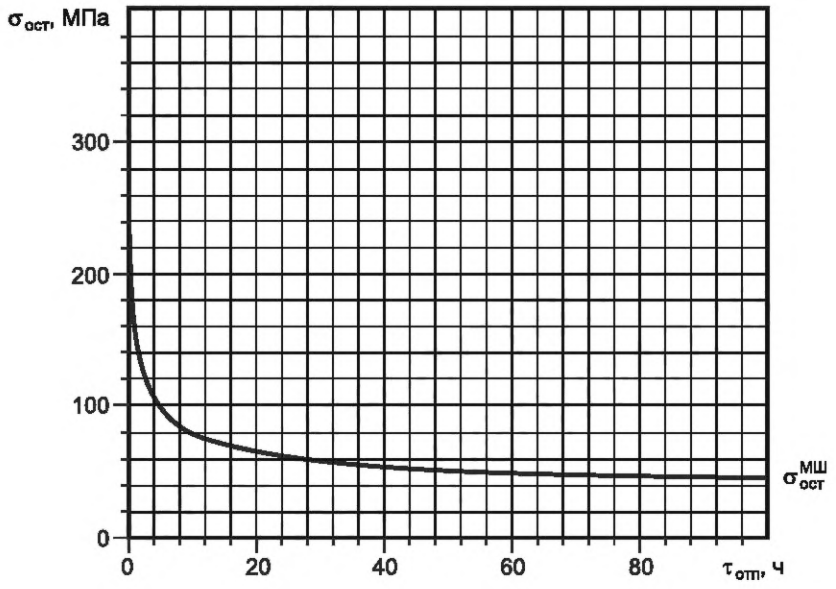



Рисунок Р.6 — Зависимость остаточных напряжений $\sigma_{ост}^{МШ}$ в сварном соединении КР от продолжительности отпуска при температуре $T_{отп}$, равной 670 °С

## Приложение С
## (обязательное)

## Коэффициенты запаса

С.1 В таблице С.1 приведены группы режимов и коэффициенты запаса $n_i$, принимаемые для ОМ и МШ КР ВВЭР.

Таблица С.1 — Группы режимов и коэффициенты запаса $n_i$

| Группа | Режимы | $n_i$ |
|---|---|---|
| 1 | НУЭ, ГИ с невыгруженной активной зоной | 2 |
| 2 | ННУЭ, НУЭ + ПЗ, ННУЭ + ПЗ, ГИ с выгруженной активной зоной, испытание систем и оборудования | 1,5 |
| 3 | ПА, НУЭ + МРЗ, ННУЭ + МРЗ, НУЭ + ПА + ПЗ | 1,0 |
| Примечания<br>1 Распределение режимов ННУЭ, включая нагрузки согласно [3], по группам определяет разработчик РУ.<br>2 Для корпусов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 ВВЭР ТОИ и ВВЭР-1200 допускается не выполнять расчет на сопротивление хрупкому разрушению в режимах НУЭ + ПЗ, ННУЭ + ПЗ, НУЭ + МРЗ, ННУЭ + МРЗ, НУЭ + ПА + ПЗ. | | |

При ГИ КР с невыгруженной активной зоной при $T > T_{tr}$ для ОМ и МШ принимают $n_i = 1{,}5$. $T_{tr}$ — температура, для которой выполняется условие

$$K_C = K_{JC}^{\text{ВШ}}.$$

С.2 Для МН принимают следующие коэффициенты запаса $n_J$:

$$n_J = \begin{cases} 1 & \text{при} \quad J_C^{20} \geq J_C^{\text{ск}} \\ 1 & \text{при} \quad J_C^{20} < J_C^{\text{ск}} \text{ и } T_{\text{эксп}} > T_{\text{ск}} \\ n_i & \text{при} \quad J_C^{20} < J_C^{\text{ск}} \text{ и } T_{\text{эксп}} \leq T_{\text{ск}} \end{cases},$$

где $J_C^{20}$ — значение $J_C$ при $T = 20$ °С;

$J_C^{\text{ск}}$ — минимальное значение $J_C{}^{20}$, при котором отсутствуют хрупкие проскоки трещины в МН;

$T_{\text{эксп}}$ — температура в МН при эксплуатации;

$T_{\text{ск}}$ — температура, выше которой хрупкие проскоки трещины в МН отсутствуют. При $J_C^{20} < J_C^{\text{ск}}$ величину $T_{\text{ск}}$ вычисляют по формуле $T_{\text{ск}} = 20 + n_T \dfrac{J_C^{\text{ск}} - J_C^{20}}{\eta_T}$, где $\eta_T = 0{,}5$ Н/(мм · °С), $n_T$ — коэффициент запаса, $n_T = 2$.

При расчетах допускается использовать величины $J_C$, $J_C^{20}$, $J_C^{\text{ск}}$ из приложения Л.

## Приложение Т
## (обязательное)

## Оценка вязкого подроста трещины в металле наплавки за период протекания переходного режима

Для расчета величины вязкого подроста трещины $\Delta a_{вяз}$ в МН температуры $T(\tau)$ и $J$-интеграла $J(\tau)$.

Весь период времени разбивают на малые промежутки $\delta\tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}$, где $i = 1, 2, \ldots, N$; $\tau_0 = 0$; $\tau_N = \tau_{ПР}$; $\tau_{ПР}$ — продолжительность переходного режима. Каждому моменту времени $\tau_i$ соответствуют значения $T_i = T(\tau_i)$ и $J_i = J(\tau_i)$.

Вязкий подрост трещины $\Delta a_{вяз}$ вычисляют по формуле

$$\Delta a_{вяз} = \sum_{i=1}^{N} \delta a_i, \tag{Т.1}$$

где $\delta a_i$ — вязкий подрост трещины в МН за промежуток времени $\delta\tau_i$, происходящий при изменении нагрузки от $J_{i-1}$ до $J_i$ и температуры от $T_{i-1}$ до $T_i$.

Величину $\delta a_i$ вычисляют по формуле

$$\delta a_i = \frac{1}{\Psi_1(T_i, J_i)} \cdot \left[ \left(J_i - J_{i-1}\right) - \Psi_2(T_i, \Delta a_{i-1}) \cdot \left(T_i - T_{i-1}\right) \right]. \tag{Т.2}$$

Значения $\Psi_1(T_i, J_i)$ и $\Psi_2(T_i, \Delta a_{i-1})$ вычисляют по формулам

$$\Psi_1\left(T_i, J_i\right) = \frac{\left[q\left(T_i, F\right)\right]^2}{2 \cdot J_i}, \tag{Т.3}$$

$$\Psi_2\left(T_i, \Delta a_{i\text{-}1}\right) = 0{,}6 \cdot \zeta\left(T_i\right) \cdot \sqrt{\Delta a_{i\text{-}1}}, \tag{Т.4}$$

где $q(T_i, F)$ вычисляют по формуле (К.7) приложения Л.

Параметр $\zeta(T_i)$ вычисляют по формуле

$$\zeta\left(T_i\right) = \frac{q\left(T_i, F\right)}{R_{p0,2}\left(T_i, F\right)} \cdot \left[ -1{,}72 \cdot \exp\left(-3{,}43 \cdot 10^{-3} \cdot \left(T_i + 273\right)\right) \right], \tag{Т.5}$$

где $R_{p0,2}(T_i, F)$ вычисляют по формулам приложения Н.

Вязкий подрост трещины $\Delta a_{i-1}$ за период времени $(\tau_{i-1} - \tau_0)$ вычисляют по формуле

$$\Delta a_{i\text{-}1} = \sum_{j=1}^{i-1} \delta a_j. \tag{Т.6}$$

Если на промежутке времени $\delta\tau_i$ вязкий подрост трещины, рассчитанный по формуле (Т.2), меньше нуля, т. е. $\delta a_i < 0$, то принимают $\delta a_i = 0$.

Для получения упрощенной консервативной оценки вязкого подроста трещины допускается $\Delta a_{вяз}$ вычисляют по формуле

$$\Delta a_{вяз} = \max_{(i=1,N)} \left\{ \left( \frac{J_i}{q\left(T_i, F\right)} \right)^2 \right\}. \tag{Т.7}$$

В формулах (Т.1)—(Т.7) $\Delta a_{вяз}$, $\Delta a_{i-1}$ и $\delta a$ в мм, $J$ в Н/мм, $q$ в Н/мм$^{3/2}$, $R_{p0,2}$ в МПа, $\zeta$ в Н/(мм$^{3/2}$ · °С), $T$ в °С.

Формулы настоящего приложения могут быть использованы при температуре $T \le 350$ °С и флюенсе нейтронов $F \le 3 \cdot 10^{24}$ 1/м$^2$.

## Приложение У
## (справочное)

### Критическая температура хрупкости материалов в исходном состоянии

Нормативные значения критической температуры хрупкости для ОМ и МШ материалов ВВЭР в исходном состоянии приведены в таблице У.1.

Таблица У.1 — Значения $T_{к0}$ для материалов и их сварных соединений в исходном состоянии

| Марка основного материала | Вид материала | Вид сварки, марка сварочных материалов | $T_{к0}$, °С |
|---|---|---|---|
| 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б | Основной металл (поковка до 420 мм) | — | −45 |
| | Металл шва | АДС, проволока Св-10ХМФТУ-А, флюс АН-42М | −10 |
| | | АДС, проволока Св-15ХГМТА, флюс 48АФ-71 | −35 |
| 15Х2НМФА-А, 15Х2НМФА класс 1 | Основной металл (поковка до 400 мм) | — | −45 |
| 15Х2НМФА-А | | | −20 |
| 15Х2НМФА-А, 15Х2НМФА класс 1 | Металл шва | АДС, проволока Св-09ХГНМТАА-ВИ, флюсы НФ-18М, ФЦ-16А; проволока Св-12Х2Н2МАА, флюс ФЦ-16А | −15 ÷ 0* |
| 15Х2МФА | Основной металл | — | 0 |
| | Металл шва | АДС, проволока Св-10ХМФТ, Св-10ХМФТУ, флюсы АН-42, АН-42М, КФ-30 | +40 |
| 15Х2МФА-А | Основной металл | — | 0 |
| | Металл шва | АДС, проволока Св-10ХМФТУ, флюсы КФ-30, АН-42М | +20 |
| * $T_{к0}$ принимают в соответствии с требованиями КД. | | | |

## Библиография


[1] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-031-01 — Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций

[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

[3] Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии НП-064-17 — Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии

УДК 621.039:531:006.354 ОКС 27.120.20

Ключевые слова: прочность, хрупкое разрушение, водо-водяной энергетический реактор, корпус реактора

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

Сдано в набор 21.10.2021. Подписано в печать 01.12.2021. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 6,73.

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