

Методология учета пространственной неоднородности свойств материала при расчете сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов ВВЭР-1000. Сообщение 1. Теоретический анализ

Б. З. Марголин^а, В. Н. Фоменко^а, А. А. Вакуленко^б, В. А. Пиминов^в,
А. А. Чернобаева^г

^а ЦНИИ КМ “Прометей”, Санкт-Петербург, Россия

^б ИПМАШ РАН, Санкт-Петербург, Россия

^в ОКБ “Гидропресс”, Подольск, Россия

^г НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

Рассмотрены основные методы прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения. Проанализирована система запасов, введение которых необходимо для адекватного и консервативного прогноза данной зависимости на основе результатов испытаний образцов-свидетелей. Предложена методология определения запаса на пространственную неоднородность свойств материалов корпуса реактора, базирующаяся на одновременном проведении детерминистического и вероятностного расчетов сопротивления хрупкому разрушению корпуса реактора.

Ключевые слова: корпус реактора, вязкость разрушения, пространственная неоднородность.

Введение. Для расчета сопротивления хрупкому разрушению (СХР) корпусов реакторов (КР) типа ВВЭР важно знать температурную зависимость вязкости разрушения $K_{Jc}(T)$.

Согласно стандарту ОАО “Концерн Росэнергоатом” РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012. “Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР при продлении срока эксплуатации до 60 лет” для расчета СХР КР используется зависимость $K_{Jc}(T)$, соответствующая 5%-ной вероятности разрушения. Только 5% всех имеющихся данных расположены ниже этой кривой.

При продлении срока службы реакторной установки очень важно учитывать реальные свойства материалов КР, поскольку это позволяет обоснованно увеличить ее ресурс. Такой учет может быть выполнен при использовании результатов испытаний образцов-свидетелей (ОС), которые изготовлены из того же материала, что и рассматриваемые элементы КР, и облучаются вместе с КР.

Использование результатов испытаний ОС при построении $K_{Jc}(T)$ для расчета СХР КР сопряжено с рядом неопределенностей, которые должны быть учтены посредством введения соответствующих запасов. К таковым в первую очередь относятся пространственная неоднородность свойств материалов КР (основной металл и металл шва), ограниченное количество ОС и возможное различие в вязкости разрушения, полученное на полно- и маломасштабных ОС.

Необходимость учета запаса, связанного с пространственной неоднородностью свойств материала КР, вытекает из следующего. При оценке СХР КР следует знать $K_{Jc}(T)$ для зоны локализации расчетного дефекта. Ввиду неоднородности свойств материалов КР образцы-свидетели могут быть вырезаны из зоны КР, СХР которой выше, чем зоны дефекта. В таком случае, если не вводить какой-либо запас, оценка СХР КР на основании результатов испытаний ОС может быть неконсервативной.

Ранее [1–8] были определены запасы, связанные с ограниченным количеством и типом ОС, используемых при построении расчетной зависимости $K_{Jc}(T)$.

Оценка запаса, связанного с пространственной неоднородностью свойств материалов КР, также была выполнена ранее [1, 2, 8], однако используемый подход был весьма приближенным, и ряд его положений принимался априори. Кроме того, экспериментальная база для количественной оценки данного запаса была весьма ограничена.

В связи с изложенным целью настоящей работы является разработка научно-обоснованного метода расчета запаса, связанного с пространственной неоднородностью материалов КР.

1. Параметры, описывающие пространственную неоднородность свойств материала КР. Под сопротивлением хрупкому разрушению материала будем понимать зависимость $K_{Jc}(T)$ для конкретной зоны основного металла или металла шва КР. Размер этой зоны мал по сравнению с любыми размерами обечайки КР или шва, но значительно больше размера зерна металла. В этом случае для такой зоны применимы все оценки в терминах K_{Jc} и параметров, контролирующих температурную зависимость $K_{Jc}(T)$. Данная зависимость для конкретного состояния материала может быть описана через различные параметры. Наиболее распространенными из них являются T_K , T_0 или Ω .

Традиционным параметром, который используется для описания $K_{Jc}(T)$, является T_K , определяемый из испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи с V-образным надрезом.

Согласно методу “Базовой кривой” [9], используемому в РД ЭО 0350-02. “Методика прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения материалов корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000”, зависимость $K_{Jc}(T)$ представляется в виде

$$K_{Jc(0,05)}^{150} = 23 + 48 \exp[0,019(T - T_K)], \quad \text{МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (1)$$

где $K_{Jc(0,05)}^{150}$ – вязкость разрушения для образцов с длиной фронта трещины (толщиной образца) $B = 150$ мм и вероятностью разрушения $P_f = 0,05$.

В настоящее время кроме косвенных методов, где учитываются данные по ударной вязкости, широко применяются прямые методы прогнозирования $K_{Jc}(T)$: “Master Curve” и “Unified Curve” по результатам испытаний ОС на вязкость разрушения.

Метод “Master Curve” [10, 11] базируется на следующих положениях.

Зависимость $K_{Jc}(T)$ для образцов с длиной фронта трещины $B = 25$ мм и вероятностью разрушения $P_f = 0,5$ описывается уравнением

$$K_{Jc(0,5)}^{25} = 30 + 70 \exp[0,019(T - T_0)], \quad \text{МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (2)$$

где T_0 – так называемая базисная температура, зависящая от степени охрупчивания материала.

Расчет зависимости $K_{Jc}(T)$ для $P_f \neq 0,5$ выполняется по уравнению

$$P_f = 1 - \exp\left(-\left(\frac{K_{Jc} - K_{\min}}{K_0 - K_{\min}}\right)^4\right), \quad (3)$$

где K_{Jc} – вязкость разрушения при вероятности P_f ; K_{\min} – минимально возможная вязкость разрушения, для материалов КР принимаемая равной $20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; K_0 – параметр масштаба, зависящий от температуры и толщины образца.

При одной и той же вероятности P_f пересчет на другую длину фронта трещины осуществляется по формуле

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

где K_{Jc}^X , K_{Jc}^Y – значения вязкости разрушения для образцов с длиной фронта трещины B_X и B_Y соответственно.

В методе “Unified Curve” используются положения (3) и (4) из “Master Curve”, но зависимость $K_{Jc(0,5)}^{25}$ описывается другим уравнением, а именно:

$$K_{Jc(0,5)}^{25} = K_{Jc}^{shelf} + \Omega \left[1 + \text{th} \left(\frac{T - 130}{105} \right) \right], \quad \text{МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (5)$$

где Ω – параметр, зависящий от степени охрупчивания материала; $K_{Jc}^{shelf} = 26 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Следует отметить, что при увеличении степени охрупчивания материала зависимость $K_{Jc}(T)$ согласно методу “Master Curve” не изменяет своей формы, что в общем случае противоречит экспериментальным данным [12–14]. Метод “Unified Curve” учитывает изменение формы кривой $K_{Jc}(T)$: с ростом степени охрупчивания параметр Ω уменьшается, и кривая $K_{Jc}(T)$ выполаживается.

Параметры T_0 в “Master Curve” и Ω в “Unified Curve” могут быть определены на основании испытаний не менее шести–девяти образцов при одной или нескольких температурах.

С учетом вышеизложенного можно заключить, что пространственная неоднородность материала КР может быть описана распределением параметров T_K , T_0 или Ω . Большинство имеющихся экспериментальных данных получено посредством испытания образцов на ударную вязкость, т.е. в терминах T_K , поэтому при дальнейшем анализе будем рассматривать неоднородность материала в терминах T_K . Как будет показано ниже, запас в терминах T_K , обозначенный как δT_{NH} , может быть использован для определения запасов в терминах T_0 или Ω .

2. Схематизация распределения T_K .

2.1. *Схематизация распределения T_K в основном металле КР.* Рассмотрим зависимость распределения параметра T_K в основном металле КР в направлениях Θ , Z , R , соответствующих цилиндрической системе координат (рис. 1).

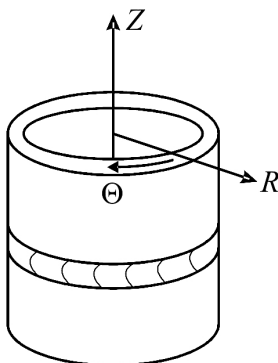


Рис. 1. Обозначение координат при исследовании неоднородности основного металла и металла шва КР.

Распределение T_K по Θ и Z имеет случайный характер и может характеризоваться единым распределением $T_K^{\Theta Z}$ (распределение T_K по сечению $\Theta - Z$ при $R = \text{const}$).

Распределение параметра T_K по толщине обечайки T_K^R (распределение T_K по R при $\Theta = \text{const}$ и $Z = \text{const}$) не может рассматриваться как распределение случайной величины, что обусловлено различной скоростью охлаждения внутренних и поверхностных зон обечайки при ее закалке. В общем случае распределение значений T_K по толщине заготовки обечайки под термическую обработку (поковка) имеет максимум, локализованный от середины до 1/4 ее толщины со стороны внутренней поверхности. Образцы-свидетели вырезаются из средней части поковки от 1/4 до 3/4 по толщине. Внутри этой зоны T_K слабо зависит от R . Тогда можно принять, что свойства ОС не лучше таковых зоны с дефектом при одних и тех же координатах Z и Θ и произвольном значении R . Следовательно, нет необходимости вводить запасы на пространственную неоднородность по координате R , и вклад распределения T_K^R при оценке запаса на пространственную неоднородность материала при построении расчетной зависимости $K_{Jc}(T)$ можно не учитывать.

Поскольку все обечайки изготавливаются по стандартной технологии, принимается, что для разных обечаек одного корпуса реактора или различных корпусов реакторов стандартное отклонение распределения $T_K^{\Theta Z}$ одно и то же. Предполагается, что распределение $T_K^{\Theta Z}$ является нормальным, и обечайки различаются только величиной математического ожидания этого распределения.

Еще один требующий разъяснения вопрос связан с состоянием материала. В настоящее время принято, что величина ΔT_F , обусловленная облучением, слабо зависит от значения T_K для материала в исходном состоянии [11, 15]. Следовательно, можно считать, что в процессе облучения математическое ожидание $M(T_K^{\Theta Z})$ растет, а стандартное отклонение, обусловленное неоднородностью свойств $\sigma(T_K^{\Theta Z})$, не изменяется. В таком случае, если запас на пространственную неоднородность связан только с $\sigma(T_K^{\Theta Z})$, он не зависит от состояния материала и может быть определен по результатам испытаний материалов КР в исходном состоянии.

2.2. Схематизация распределения T_K по сварному шву КР. Для сварного шва равноправность направлений в распределении T_K по направлениям Z , R и Θ обусловлена металлургическими особенностями его выполнения. Все проходы в шве имеют практически одинаковый размер и претерпевают один и тот же термомеханический цикл сварки и один и тот же отпуск. Ввиду малости размера валика неоднородность его свойств вследствие разной скорости охлаждения различных зон практически исключается. Поэтому неоднородность свойств металла валика в основном обусловлена металлургическими особенностями литого материала. Свойства сходственных зон различных валиков достаточно близки.

Таким образом, разброс значений T_K в шве вызван различной локализацией надреза в образцах Шарпи относительно центра валика. Если надрез локализован в центре валика, сопротивление хрупкому разрушению ниже и, следовательно, T_K выше; если надрез локализован в зоне перекристаллизации двух валиков, сопротивление хрупкому разрушению выше и, значит, T_K ниже.

Таким образом, можно принять, что распределение T_K по направлениям Z , R и Θ имеет случайный характер и может характеризоваться единым распределением T_K по всему объему шва.

Принимается, что для разных кольцевых сварных швов одного корпуса реактора или различных корпусов реакторов стандартное отклонение распределения T_K одно и то же. Разные швы отличаются только величиной математического ожидания этого

распределения. Распределение $T_K^{R\Theta Z}$ является нормальным. Как и для основного металла, принимается, что в процессе облучения математическое ожидание $M(T_K^{R\Theta Z})$ будет расти, а стандартное отклонение, обусловленное неоднородностью свойств $\sigma(T_K^{R\Theta Z})$, не изменяется.

3. Формулировка задачи определения запаса δT_{NH} . Рассматриваются случайные распределения T_K по объему обечайки и по объему сварного шва. Случайное распределение T_K по объему обечайки характеризуется случайным распределением $T_K^{\Theta Z}$, по металлу шва – случайным распределением $T_K^{R\Theta Z}$.

Необходимо определить величину запаса δT_{NH} , при котором с заданной вероятностью будет выполняться условие

$$T_K^{3Д} < T_K^{OC} + \delta T_{NH}, \quad (6)$$

где $T_K^{3Д}$ – значение T_K для зоны локализации дефекта (точнее – локализации вершины постулированной трещины); T_K^{OC} – значение T_K , определенное по результатам испытаний ОС.

Вероятностную трактовку условия (6) можно представить в виде

$$P(T_K^{3Д} < T_K^{OC} + \delta T_{NH}) = \bar{P}_\Delta \quad (7)$$

или

$$P(\Delta T_K < \delta T_{NH}) = \bar{P}_\Delta, \quad (8)$$

где

$$\Delta T_K = T_K^{3Д} - T_K^{OC}; \quad (9)$$

$P(T_K^{3Д} < T_K^{OC} + \delta T_{NH})$ и $P(\Delta T_K < \delta T_{NH})$ – вероятности событий, указанных в скобках; \bar{P}_Δ – некоторая заданная вероятность.

Образцы-свидетели могут быть вырезаны случайным образом из любой зоны пробного кольца поковки с точки зрения ее расположения относительно координат Z и Θ . Зона с дефектом (ЗД) – также имеет случайные координаты Z и Θ . Неслучайной координатой как для зоны вырезки ОС, так и для ЗД является радиальное направление R . Как указывалось выше, зона вырезки ОС локализована в средней части поковки от 1/4 до 3/4 по толщине. По причинам, изложенным в разд. 2, консервативная оценка δT_{NH} может быть выполнена при исключении радиального направления из рассмотрения задачи. Тогда можно принять, что случайные величины $T_K^{3Д}$ и T_K^{OC} принадлежат к одной и той же генеральной совокупности, описываемой в основном металле нормальным распределением $T_K^{\Theta Z}$, которое характеризуется математическим ожиданием $M(T_K^{\Theta Z})$ и стандартным отклонением $\sigma(T_K^{\Theta Z})$. Тогда распределение ΔT_K , характеризующее разность двух случайных величин T_K , принадлежащих к одной и той же генеральной совокупности (см. (9)), описывается следующими параметрами для основного металла (ОМ):

$$M_{OM}^\Delta = 0, \quad (10)$$

$$\sigma_{OM}^\Delta = \sqrt{2} \sigma(T_K^{\Theta Z}). \quad (11)$$

Исходя из условия (8) величина δT_{NH} для обечайки может быть рассчитана по формуле

$$\delta T_{NH}^{OM} = z_{\bar{P}_\Delta} \sigma_{OM}^\Delta, \quad (12)$$

где $z_{\bar{P}_\Delta}$ – квантиль нормированного нормального распределения, соответствующая доверительной вероятности \bar{P}_Δ . Например, для одностороннего интервала при $\bar{P}_\Delta = 0,95$ значение $z_{\bar{P}_\Delta} = 1,645$.

Аналогичный подход может быть применен и к металлу сварного шва (МШ). В этом случае имеем

$$\sigma_{MШ}^\Delta = \sqrt{2} \sigma(T_K^{R\Theta Z}), \quad (13)$$

$$\delta T_{NH}^{MШ} = z_{\bar{P}_\Delta} \sigma_{MШ}^\Delta. \quad (14)$$

Таким образом, для оценки запасов на пространственную неоднородность материалов КР δT_{NH}^{OM} и $\delta T_{NH}^{MШ}$ необходимо и достаточно знать стандартные отклонения распределений $T_K^{\Theta Z}$ для обечайки КР и $T_K^{R\Theta Z}$ для сварного шва, а также значения доверительной вероятности \bar{P}_Δ . Информация о математических ожиданиях распределений $T_K^{\Theta Z}$ и $T_K^{R\Theta Z}$ не требуется.

Определение параметров распределений $T_K^{\Theta Z}$ и $T_K^{R\Theta Z}$ на основе экспериментальных исследований будет представлено в сообщении 2 настоящей работы.

4. Процедура определения доверительной вероятности \bar{P}_Δ .

4.1. **Формулировка задачи для определения \bar{P}_Δ .** Прежде всего следует отметить, что запас δT_{NH} предназначен для введения его в расчетную зависимость $K_{Jc}(T)$, которая используется в детерминистическом расчете СХР КР. Запас δT_{NH} однозначно зависит от \bar{P}_Δ : с ростом \bar{P}_Δ согласно формулам (12) и (14) параметр δT_{NH} увеличивается. Следовательно, корректное назначение \bar{P}_Δ позволяет ввести адекватную величину запаса δT_{NH} .

Обычно принято использовать доверительную вероятность, равную 0,95. Ясно, что достаточность такой величины не может быть оценена на основании детерминистического расчета СХР КР. Поэтому основная цель определения величины \bar{P}_Δ заключается в одновременном рассмотрении детерминистического и вероятностного расчета СХР КР. Детерминистический расчет может быть выполнен согласно РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012. Величина \bar{P}_Δ определяется из следующего условия: при детерминистическом расчете СХР КР в виде

$$nK_1 = K_c(T - \delta T_{NH}) \quad (15)$$

вероятность их разрушения P_f^{KP} не должна превышать принятую нормативную величину, т.е.

$$P_f^{KP} < [P_f^{KP}]. \quad (16)$$

Величина $[P_f^{KP}]$ принимается в соответствии с нормативными документами по вероятностному обоснованию безопасности эксплуатации КР, например как регламентировано в [16] или [17]. В (15) $K_c(T - \delta T_{NH})$ – температурная зависимость вязкости разрушения материала КР с учетом влияния эффекта коротких трещин; n – коэффициент запаса; K_1 – коэффициент интенсивности напряжений (КИН).

Размер, форма и локализация постулированного дефекта, а также коэффициент запаса принимаются согласно РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012.

Рассматривается постулированный дефект – полуэллиптическая поднаплавочная трещина с малой полуосью a , большой полуосью c и соотношением $c/a = 3$ (рис. 2).

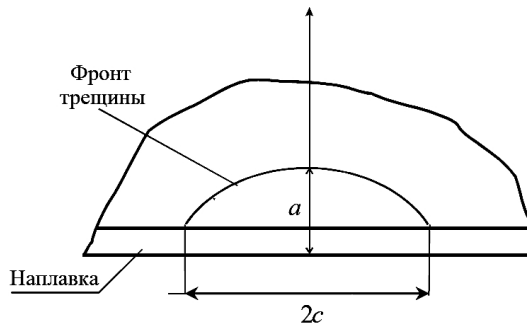


Рис. 2. Постулированный дефект.

С увеличением \bar{P}_Δ повышается запас δT_{NH} и уменьшается K_c . Следовательно, чтобы обеспечить выполнение детерминистического условия прочности (15), необходимо уменьшить K_I . С уменьшением K_I вероятность P_f^{KP} будет снижаться. Таким образом, можно найти совокупность значений \bar{P}_Δ , при которых условие (16) будет выполняться. Минимальная величина \bar{P}_Δ , при которой условие (16) еще выполняется, является искомой для расчета δT_{NH} .

4.2. Схематизация детерминистического расчета СХР КР. Будем рассматривать самый опасный режим нагружения КР – аварийную ситуацию (АС), при которой происходит аварийное расхолаживание.

Неизометрическое нагружение КР по кривой $1-2$ будем схематизировать линией $1'-2$ (рис. 3). Такое допущение дает консервативную оценку вероятности разрушения, так как для всего периода нагружения отношение K_I/K_c выше при нагружении по линии $1'-2$, чем по линии $1-2$.

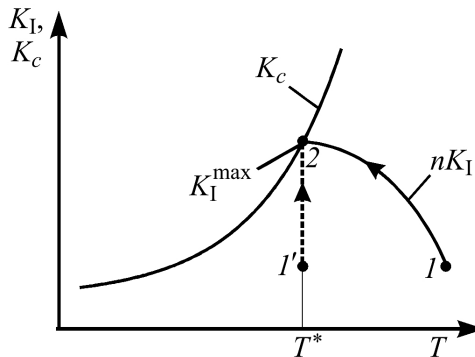


Рис. 3. Схема нагружения в режиме АС.

Для упрощения расчетов будем использовать “Базовую кривую” [9] в виде (1).

Согласно РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012 параметр K_c может быть рассчитан по формуле

$$K_c = \omega \omega_b K_{Jc(0,05)}^{B_{pos}}, \quad (17)$$

где $K_{Jc(0,05)}^{B_{pos}}$ – вязкость разрушения образца с глубокой трещиной при длине ее фронта, равной длине фронта трещины постулируемого дефекта B_{pos} с учетом запаса δT_{NH} при $P_f = 0,05$; ω и ω_b – коэффициенты, учитывающие влияние эффекта коротких трещин и двухосного нагружения на вязкость разрушения соответственно.

Обоснование уравнения (17) представлено ранее [18–20]:

$$\omega = [m \exp(1/m) \arccos(\exp(-1/m)) \sqrt{1 - \exp(-2/m)} - 1]^{1/2}, \quad (18)$$

где

$$m = 2,55a / [K_{Jc(0,05)}^{B_{pos}} / \sigma_Y]^2; \quad (19)$$

σ_Y – предел текучести; a – глубина расчетного дефекта;

$$\omega_b = \begin{cases} 1 & \text{при } m_\omega > 0,7; \\ 1 - 0,1\beta & \text{при } m_\omega \leq 0,7; \end{cases} \quad (20)$$

$m_\omega = m/\omega^2$; β – отношение номинальных напряжений, действующих параллельно плоскости расчетного дефекта вдоль его фронта, к номинальным напряжениям, действующим перпендикулярно к плоскости расчетного дефекта.

С использованием уравнений (1), (4), а также учитывая запас δT_{NH} , величина $K_{Jc(0,05)}^{B_{pos}}$ может быть рассчитана по формуле

$$K_{Jc(0,05)}^{B_{pos}} = \left(\frac{150}{B_{pos}} \right)^{1/4} (\tilde{K}_{Jc(0,05)}^{150} - K_{\min}) + K_{\min}, \quad (21)$$

где

$$\tilde{K}_{Jc(0,05)}^{150} = 23 + 48 \exp[0,019(T - T_K - \delta T_{NH})], \quad \text{МПа}\sqrt{\text{м}}. \quad (22)$$

(В формуле (21) и далее B_{pos} приводится в мм.)

С учетом условия (15) и зависимости (17) получим

$$\tilde{K}_{Jc(0,05)}^{150} = \left(\frac{B_{pos}}{150} \right)^{1/4} \left(\frac{nK_I^{\max}}{\omega\omega_b} - K_{\min} \right) + K_{\min}. \quad (23)$$

4.3. Вероятностный расчет СХР КР. Введем некоторые определения: P^{AC} – частота наступления режима АС, измеряемая числом событий в год; $P^{def}(a)$ – вероятность того, что дефект будет иметь глубину меньше a ; $f^{def}(a)da$ – вероятность того, что дефект имеет размер в диапазоне $[a, a + da]$, где $f^{def}(a)$ – плотность распределения дефектов по размерам; P_{fa} – вероятность разрушения КР с дефектом заданных размеров при наступлении режима АС; $\rho^{МШ}$ – концентрация дефектов на единицу длины шва.

Величина $P^{def}(a)$ принимается в виде экспоненциальной функции

$$P^{def}(a) = 1 - \exp(-a/\bar{a}), \quad (24)$$

где \bar{a} – константа; P^{detect} – вероятность обнаружения дефекта площадью S^{def} неразрушающим ультразвуковым контролем; $(1 - P^{detect})$ – вероятность пропуска дефекта площадью S^{def} .

Базируясь на введенных определениях вероятности, вероятность разрушения КР (точнее – частота разрушений КР) с дефектом размерами a и $c = 3a$ может быть рассчитана по следующей формуле:

$$dP_a^{KP} = P^{AC} f^{def}(a)(1 - P^{detect}(S^{def}))P_{fa} da, \quad (25)$$

где $S^{def} = \pi ac/2 = 3\pi a^2/2$.

Тогда вероятность разрушения КР при изменении размера дефекта a от 0 до $0,25t$ будет

$$P_f^{KP} = P^{AC} \int_{a=0}^{a=0,25t} f^{def}(a)(1 - P^{detect}(S^{def}))P_{fa} da. \quad (26)$$

При наличии в подверженных нейтронному облучению швах КР нескольких дефектов воспользуемся теорией наислабейшего звена, согласно которой нестабильное развитие хотя бы одного из дефектов приводит к разрушению КР в целом:

$$(P_f^{KP})^{MШ} = 1 - (1 - P_f^{MШ})^{n_{MШ}}, \quad (27)$$

где $(P_f^{KP})^{MШ}$ – вероятность разрушения КР в предположении, что дефекты имеются только в швах (основной металл не имеет дефектов); $P_f^{MШ}$ – вероятность разрушения КР в предположении, что в швах имеется только один дефект, $P_f^{MШ}$ рассчитывается по формуле (26), где $P_f^{KP} = P_f^{MШ}$; $n_{MШ} = L/\rho_{MШ}$ – количество дефектов в швах, подверженных нейтронному облучению; L – общая длина швов, подверженных нейтронному облучению.

Для основного металла применима формула, аналогичная (27):

$$(P_f^{KP})^{OM} = 1 - (1 - P_f^{OM})^{n_{OM}}, \quad (28)$$

где $(P_f^{KP})^{OM}$ – вероятность разрушения КР в предположении, что дефекты имеются только в ОМ (в МШ дефекты отсутствуют); P_f^{OM} – вероятность разрушения КР в предположении, что в ОМ имеется только один дефект, P_f^{OM} рассчитывается по формуле (26), где $P_f^{KP} = P_f^{OM}$; n_{OM} – количество дефектов в ОМ, подверженном нейтронному облучению.

Базируясь на формулах (27) и (28) и теории наислабейшего звена, при наличии дефектов как в шве, так и в основном металле вероятность разрушения КР в целом $(P_f^{KP})_{\Sigma}$ может быть рассчитана по формуле

$$(P_f^{KP})_{\Sigma} = 1 - (1 - P_f^{MШ})^{n_{MШ}} (1 - P_f^{OM})^{n_{OM}}. \quad (29)$$

Рассмотрим зависимости, описывающие вероятности событий, включенные в формулу (26).

Частота P^{AC} .

Частоты различных сценариев режима АС согласно оценкам ОКБ “Гидропресс” представлены в таблице.

Обобщение частот различных сценариев режима АС

№ п/п	Исходное событие	Частота, год ⁻¹
1	Малая течь первого контура 1 ($13 < Ду \leq 25$)	$2,7 \cdot 10^{-3}$
2	Малая течь первого контура 2 ($25 < Ду \leq 36$)	$2,4 \cdot 10^{-3}$
3	Малая течь первого контура 3 ($36 < Ду \leq 50$)	$1,2 \cdot 10^{-3}$
4	Средняя течь первого контура 1 ($50 < Ду \leq 80$)	$7,5 \cdot 10^{-5}$
5	Средняя течь первого контура 2 ($80 < Ду \leq 105$)	$5,6 \cdot 10^{-5}$
6	Средняя течь первого контура 3 ($105 < Ду \leq 125$)	$4,1 \cdot 10^{-5}$
7	Большая течь первого контура 1 ($179 < Ду \leq 279$)	$2,1 \cdot 10^{-4}$
8	Большая течь первого контура 2 ($279 < Ду \leq 850$)	$2,6 \cdot 10^{-4}$
9	Средняя течь из первого контура во второй ($13 < Ду \leq 43$)	$1,9 \cdot 10^{-4}$
10	Большая течь из первого контура во второй (более Ду43)	$5,0 \cdot 10^{-6}$
11	Непреднамеренное открытие импульсно-предохранительного устройства компенсатора давления	$4,5 \cdot 10^{-3}$

Просуммировав представленные в таблице частоты, получим частоту возникновения АС:

$$P^{AC} \approx 1,2 \cdot 10^{-2} \quad \text{год}^{-1}. \quad (30)$$

Вероятность $P^{def}(a)$ и $f^{def}(a)$.

Согласно [21] для металла кольцевых сварных швов КР ВВЭР-1000, выполненных автоматической дуговой сваркой (АДС), при $l = 9$ мм имеем $P^{def} = 0,99$, где l – протяженность дефекта (рис. 4). Принимая, что $a = l/2$, получаем

$$P^{def}(a = 4,5 \text{ мм}) = 0,99. \quad (31)$$

Тогда параметр \bar{a} в уравнении (24) может быть определен как

$$\bar{a} = - \frac{a}{\ln(1 - P^{def}(a))} = 0,98 \text{ мм}. \quad (32)$$

С учетом формулы (24) получим

$$f^{def}(a) = \frac{dP^{def}(a)}{da} = \frac{1}{\bar{a}} \exp\left(-\frac{a}{\bar{a}}\right). \quad (33)$$

Следует отметить, что зависимость $f^{def}(a)$ получена на базе зависимости $P^{def}(l)$, построенной по данным радиографического контроля, который позволяет обнаружить по протяженности все сколь угодно малые, с точки зрения хрупкой проч-

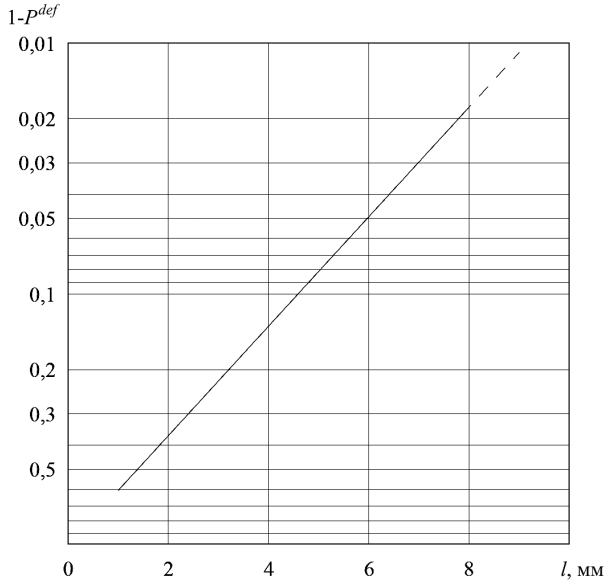


Рис. 4. Зависимость вероятности наличия дефекта P^{def} от его протяженности l для кольцевых сварных швов корпусов реакторов ВВЭР-1000, выполненных АДС, по данным радиографического контроля.

ности, дефекты. Поскольку зависимость $P^{def}(l)$ была построена по данным до ремонта, она включает недопустимые дефекты, которые были отремонтированы, и, следовательно, является консервативной. При переходе от протяженности l к длине a использовался весьма консервативный переход, для компактного дефекта $a = l/2$. Реально трещиноподобные дефекты обычно протяженные, для них характерно l/a от 3 до 6.

Проводя консервативную оценку, примем, что для ОМ значение \bar{a} такое же, как и для МШ.

Вероятность P^{detect} – вероятность обнаружения дефекта площадью S^{def} .

В соответствии с [22] функция выявляемости $P^{detect}(S^{def})$ для дефектов в шве и поднаплавочных дефектов, ориентированных нормально к внутренней поверхности КР с возможным 5%-ным отклонением, может быть рассчитана по формуле

$$P^{detect}(S^{def}) = \left[1 + \exp\left(-\frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{\ln S^{def} - \ln S_{th}}{\bar{S}}\right) \right]^{-1}, \quad (34)$$

где \bar{S} , $\ln S_{th}$ – константы, зависящие от методики и средств ультразвукового контроля (УЗК) и ориентации дефекта.

В формуле (34) при УЗК с помощью системы СК-187МБ имеем $\bar{S} = 0,328$, $\ln S_{th} = 3,9595$ [22].

Вероятность P_{fa} .

В общем случае вероятность разрушения КР при наличии дефекта, у которого по фронту трещины распределение K_I является однородным, рассчитывается по формуле

$$P_{fa} = 1 - \exp\left(-\left(\frac{K_I - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right)^4\right), \quad (35)$$

где K_0 – параметр масштаба в распределении Вейбулла, зависящий от температуры и толщины образца; K_1 – величина КИН при заданной термостатической нагрузке в режиме АС, зависящая от размеров дефекта.

Обеспечивая консервативность расчета P_{fa} , примем, что распределение K_1 вдоль фронта полуэллиптической трещины является однородным и равным наибольшему значению.

Для расчета по формуле (35) необходимо знать значение K_0 . Поскольку T_K является случайной величиной, то и K_0 – также случайная величина. Зона дефекта также локализована в КР случайным образом. Поэтому для расчета по формуле (35) следует знать распределение K_0 для дефекта, локализованного в случайном месте КР. Как показано в разд. 3, случайное распределение T_K по КР и случайная локализация дефекта приводят к условию, что $\Delta T_K = T_K^{3Д} - T_K^{ОС}$ является случайной величиной с математическим ожиданием $M^\Delta = 0$ и стандартным отклонением σ^Δ , рассчитываемым по формулам (11) и (13). Из уравнений (1) и (22) можно получить

$$\frac{K_{Jc(0,05)}^{150}(\Delta T_K) - 23}{\tilde{K}_{Jc(0,05)}^{150} - 23} = \exp(-0,019(\Delta T_K - \delta T_{NH})), \quad (36)$$

где $K_{Jc(0,05)}^{150}(\Delta T_K) = 23 + 48 \exp(0,019(T - T_K - \Delta T_K))$.

Из формул (22), (23) и (36) имеем

$$K_{Jc(0,05)}^{150}(\Delta T_K) = \left(\left(\frac{B_{pos}}{150} \right)^{1/4} \left(\frac{nK_I^{max}}{\omega\omega_b} - K_{min} \right) + K_{min} - 23 \right) \exp(-0,019(\Delta T_K - \delta T_{NH})) + 23 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}. \quad (37)$$

С использованием формул (3) и (37) получим

$$\bar{K}_0(\Delta T_K) = C_1 \exp(-0,019(\Delta T_K - \delta T_{NH})) - 1,1K_{min} + 48,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (38)$$

где \bar{K}_0 – значение K_0 в зоне дефекта при $B = 150$ мм; ω , ω_b – коэффициенты, соответствующие размерам постулируемого дефекта при детерминистическом расчете;

$$C_1 = 2,1 \left(\left(\frac{B_{pos}}{150} \right)^{1/4} \left(\frac{K_c}{\omega\omega_b} - K_{min} \right) + K_{min} - 23 \right).$$

Поскольку $C_1 > 0$, формулу (39) можно переписать в виде

$$\bar{K}_0^P = C_1 \exp(0,019(\delta T_{NH} - \Delta T_K^{1-P})) - 1,1K_{min} + 48,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}, \quad (39)$$

где \bar{K}_0^P – значение K_0 , для которого с вероятностью P выполняется условие $K_0 < \bar{K}_0^P$ (верхний индекс в \bar{K}_0^P обозначает уровень вероятности); ΔT_K^{1-P} – значение ΔT_K , для которого с вероятностью $1-P$ выполняется условие $\Delta T_K < \Delta T_K^{1-P}$.

Распределение ΔT_K и соответственно вероятность $P(\Delta T_K \leq \Delta T_K^{1-P})$ могут быть определены при известных значениях стандартных отклонений $\sigma_{ОМ}^\Delta$ для ОМ и $\sigma_{МШ}^\Delta$ для МШ.

Расчет P_{fa} может быть выполнен по следующей зависимости:

$$P_{fa} = \int_{K_{\min}}^{K_{Jc}^{duct}} f^{\bar{K}_0}(\bar{K}_0) \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{K_1^a - K_{\min}}{(K_0^a)_{sh} - K_{\min}} \right)^4 \right) \right) d\bar{K}_0, \quad (40)$$

где $f^{\bar{K}_0}(\bar{K}_0)d\bar{K}_0$ – вероятность того, что вязкость разрушения материала в зоне дефекта находится в интервале $[\bar{K}_0, \bar{K}_0 + d\bar{K}_0]$; \bar{K}_0 соответствует длине фронта трещины, равной 150 мм; K_1^a – величина K_1 при размерах дефекта a и c в режиме АС, $K_1^a = K_1^{\max} \sqrt{a}/\sqrt{a_{pos}}$; a_{pos} – глубина постулируемого дефекта; $(K_0^a)_{sh}$ – величина K_0 при размерах дефекта a и c при учете коротких трещин и двухосности нагружения; K_{Jc}^{duct} – уровень верхнего шельфа $K_{Jc}(T)$, $K_{Jc}^{duct} = 230 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Функцию $f^{\bar{K}_0}(\bar{K}_0)$ можно определить, проинтегрировав $P^{\bar{K}_0}(\bar{K}_0)$, где $P^{\bar{K}_0}(\bar{K}_0)$ – вероятность того, что вязкость разрушения материала в зоне дефекта меньше \bar{K}_0 . Зависимость $P^{\bar{K}_0}(\bar{K}_0)$ может быть рассчитана из уравнения (39).

С использованием уравнений (4) и (17) значение $(K_0^a)_{sh}$ может быть рассчитано по формуле

$$(K_0^a)_{sh} = \omega \omega_b \left[\left(\frac{150}{B_a} \right)^{1/4} (\bar{K}_0 - K_{\min}) + K_{\min} \right], \quad (41)$$

где ω , ω_b – рассчитываются по формулам (18)–(20). В формуле (19) вместо $K_{Jc(0,05)}^{B_{pos}}$ используется величина, равная $\left(\frac{150}{B_a} \right)^{1/4} (\bar{K}_0 - K_{\min}) + K_{\min}$; B_a – длина фронта трещины для дефекта глубиной a , мм.

Таким образом получены все необходимые уравнения и зависимости для определения запаса на пространственную неоднородность δT_{NH} .

5. Определение запаса на пространственную неоднородность свойств в терминах T_K , T_0 и Ω . Для определения запасов в терминах T_0 и Ω необходимо располагать информацией о связи ΔT_K с $\Delta T_{K_{Jc}}$. Для многих реакторных материалов было получено простое корреляционное соотношение в виде

$$\Delta T_{K_{Jc}} = k \Delta T_K, \quad (42)$$

где k – коэффициент, значение которого близко к единице, для разных реакторных материалов с разной степенью охрупчивания k варьируется от 0,9 до 1,15 [23].

В большинстве практически важных случаев коэффициент k может быть принят равным единице. При условии $k = 1$ можно записать

$$\delta T_0 = \delta T_{NH}, \quad (43)$$

где δT_0 – запас на пространственную неоднородность в терминах T_0 .

Определение запаса на пространственную неоднородность в терминах Ω . Согласно [14] связь Ω с $\delta T_{K_{Jc}}$ определяется уравнением

$$\frac{\Omega - \Omega_{\min}}{\Omega_0 - \Omega_{\min}} = \exp\left(-\frac{2}{105^\circ\text{C}} \Delta T_{K_{Jc}}\right), \quad (44)$$

где Ω_0 соответствует величине Ω при $\Delta T_{K_{Jc}} = 0$; $\Omega_{\min} = 37 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$.

Подставляя в (44) вместо $\Delta T_{K_{Jc}}$ величину запаса δT_{NH} , получаем

$$\frac{\Omega_\eta - \Omega_{\min}}{\Omega - \Omega_{\min}} = \eta, \quad (45)$$

где Ω – параметр, определенный по результатам испытаний ОС; Ω_{\min} – расчетная величина с учетом запаса на пространственную неоднородность; η – коэффициент запаса на пространственную неоднородность, $\eta = \exp\left(-\frac{2}{105^\circ\text{C}} \Delta T_{K_{Jc}}\right)$.

Таким образом, для учета запаса на пространственную неоднородность в терминах T_K необходимо рассматривать уравнение $K_{Jc}(T - T_K - \delta T_{NH})$, в терминах $T_0 - K_{Jc}(T - T_0 - \delta T_0)$, в терминах $\Omega - K_{Jc}(T, \Omega, \eta)$.

В сообщении 2 настоящей работы на основании выполненных экспериментов и расчетов будут определены конкретные величины δT_{NH} , δT_0 и η для КР ВВЭР-1000.

Выводы

1. Показано, что для расчета сопротивления хрупкому разрушению КР в зависимости $K_{Jc}(T)$, определенную на базе результатов испытаний ОС, необходимо вводить запас δT_{NH} на пространственную неоднородность свойств материалов КР.

2. Предложена методология определения запаса на пространственную неоднородность свойств материалов КР для прогнозирования расчетной зависимости $K_{Jc}(T)$ на основе результатов испытаний ОС.

2.1. Сформулировано определение запаса на пространственную неоднородность свойств материала. Величина этого запаса δT_{NH} определяется величиной квантили распределения разности двух случайных величин T_K , принадлежащих одной генеральной совокупности, описывающей распределение T_K по объему материала. Исходя из предложенной формулировки запас δT_{NH} может быть рассчитан на основании известного значения стандартного отклонения распределения T_K . Информация о значении математического ожидания T_K не требуется.

2.2. Показано, что величина запаса не зависит от степени облучения материала КР ввиду его однозначной зависимости только от стандартного отклонения T_K . Поэтому запас может быть определен на основании испытаний материала в исходном состоянии.

2.3. Для расчета запаса необходимо знать величину доверительной вероятности \bar{P}_Δ , с которой выполняется условие $T_K^{3Д} < T_K^{OC} + \delta T_{NH}$, где $T_K^{3Д}$ – значение T_K для зоны локализации дефекта; T_K^{OC} – значение T_K , определенное по результатам испытаний ОС. В отличие от широко распространенного подхода – принимать величину доверительной вероятности априори – разработан метод расчета \bar{P}_Δ . Базируется он на том, что при выполнении детерминистического условия прочности по критерию хрупкого разрушения в виде $nK_1 = K_c$ вероятность разрушения КР не должна превышать допустимую величину.

3. Предложены зависимости, связывающие запас на пространственную неоднородность в терминах T_K с запасом в терминах T_0 и Ω .

Резюме

Розглянуто основні методи прогнозування температурної залежності в'язкості руйнування. Проаналізовано систему запасів, введення яких необхідно для адекватного і консервативного прогнозу даної залежності на основі результатів випробувань зразків-свідків. Запропоновано методологію визначення запасу на просторову неоднорідність властивостей матеріалів корпусу реактора, що базується на одночасному проведенні детерміністичного й імовірнісного розрахунків опору крихкому руйнуванню корпусу реактора.

1. *Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г. и др.* Построение расчетной температурной зависимости вязкости разрушения корпусных реакторных материалов: общие принципы и результаты // Тяжелое машиностроение. – 2008. – № 12. – С. 9–13.
2. *Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Гуленко А. Г. и др.* Прогнозирование расчетной температурной зависимости вязкости разрушения материалов корпусов реакторов на основе результатов испытаний образцов-свидетелей // Вопр. материаловедения. – 2008. – Вып. 3 (55). – С. 111–124.
3. *Николаев В. А., Марголин Б. З., Фоменко В. Н., Рядков Л. Н.* Применение малоразмерных образцов с глубокими боковыми канавками для прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения. Часть 1. Экспериментально-расчетные исследования // Там же. – С. 41–59.
4. *Марголин Б. З., Фоменко В. Н.* Применение малоразмерных образцов с глубокими боковыми канавками для прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения. Часть 2. Анализ напряженно-деформированного состояния и применимости критериев разрушения // Там же. – С. 60–71.
5. *Николаев В. А., Марголин Б. З., Рядков Л. Н., Фоменко В. Н.* Анализ применимости малоразмерных образцов для прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения // Пробл. прочности. – 2009. – № 2. – С. 5–26.
6. *Марголин Б. З., Фоменко В. Н.* Анализ применимости различных критериев для прогнозирования вязкости разрушения на малоразмерных образцах // Там же. – № 4. – С. 5–18.
7. *Margolin B., Nikolaev V., Fomenko V., and Ryadkov L.* Modification of pre-cracked Charpy specimens for surveillance specimen programs // Proc. of ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (July 26–30, 2009, Prague, Czech Republic). – Paper No. PVP2009-77096.
8. *Margolin B., Shvetsova V., Gulenko A., and Fomenko V.* Prediction of fracture toughness for WWER RPV integrity assessment on the basis of the Unified Curve approach and surveillance specimens testing // Proc. of ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference (July 26–30, 2009, Prague, Czech Republic). – Paper No. PVP2009-77082.
9. *Марголин Б. З., Гуленко А. Г.* Концепция “Базовой кривой” // Машиностроение. Энциклопедия. – Т. II-1: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов / Под общ. ред. Е. И. Мамаевой. – М.: Машиностроение, 2010. – 852 с.
10. *ASTM E 1921-02.* Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range // Annual Book of ASTM Standards. – Philadelphia, 2002. – Vol. 03.01. – P. 1068–1084.

11. Merkle J. G., Wallin K., and McCabe D. E. Technical Basis for an ASTM Standard on Determining the Reference Temperature, T_0 for Ferritic Steels in the Transition Range // NUREG/CR-5504, ORNL/TM-13631, 1999.
12. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Nikolaev V. A., and Ryadkov L. N. A new engineering method for prediction of the fracture toughness temperature dependence for RPV steels // Int. J. Press. Vess. Piping. – 2003. – **80**. – P. 817–829.
13. Марголин Б. З., Гуленко А. Г., Николаев В. А., Рядков Л. Н. Новый инженерный метод прогнозирования температурной зависимости трещиностойкости сталей для сосудов давления // Пробл. прочности. – 2003. – № 5. – С. 12–35.
14. Margolin B., Gurovich B., Fomenko V., et al. Fracture toughness prediction for highly irradiated RPV materials: from test results to RPV integrity assessment // J. Nucl. Mater. – 2013. – **432**. – P. 313–322.
15. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
16. ПНАЭ Г-01-011-97. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – М., 1998. – 55 с.
17. Guidelines for Integrity and Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs during Operation. – VERLIFE, Version 2011.
18. Марголин Б. З., Костылев В. И. Анализ влияния двухосного нагружения на вязкость разрушения корпусных реакторных сталей // Пробл. прочности. – 1999. – № 5. – С. 5–26.
19. Margolin B. Z. and Kostylev V. I. Analysis of biaxial loading effects on fracture toughness of reactor pressure vessel steels // Int. J. Press. Vess. Piping. – 1998. – **75**. – P. 589–601.
20. Karzov G., Margolin B., and Rivkin E. Analysis of structure integrity of RPV on the basis of brittle fracture criterion: new approaches // Ibid. – 2004. – **81**. – P. 651–656.
21. Игнатов В. А., Тимофеев Б. Т., Черноенко Т. А. Статистический анализ размера дефекта в корпусах энергетического оборудования по результатам неразрушающего контроля на стадии изготовления // Вопр. атом. науки и техники. Сер. физика и технология ядерных реакторов. – 1985. – Вып. 6. – С. 71–75.
22. Варовин А. Я. Определение допускаемых дефектов в сварных элементах сосудов высокого давления и разработка концепции эксплуатационного неразрушающего контроля корпусов реакторов ВВЭР-1000: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2004. – 24 с.
23. Sokolov M. A. and Nanstad R. K. Comparison of irradiation-induced shifts of K_{Jc} and Charpy impact toughness for reactor pressure vessel steels // Effects of Radiation on Materials: 18th International Symposium. – ASTM STP 1325, 1999. – P. 167–190.

Поступила 30. 12. 2014