

УДК 539.3(4)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ С УЧЕТОМ РАЗБРОСА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

И. В. ОРЫНЯК, М. Н. ЗАРАЗОВСКИЙ, А. В. БОГДАН

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев

Предложен оригинальный физически обоснованный метод определения разброса значений критической температуры хрупкости (КТХ). Принципиальным его отличием и преимуществом (от стандартного) является определение разброса данных не из набора значений КТХ, а из первичных результатов для вычисления КТХ. Введены количественные характеристики серии экспериментов на ударную вязкость для определения КТХ: эффективное количество экспериментальных точек и вес (степень влияния) каждой из них на КТХ. Предложен также критерий достаточности количества значений ударной вязкости для адекватного нахождения из них КТХ. Описаны многочисленные эксперименты, которые продемонстрировали хорошую корреляцию разброса значений КТХ, полученных предложенным методом, и соответственных стандартных отклонений.

Ключевые слова: статическая трещиностойкость, критическая температура хрупкости, энергия разрушения образцов Шарпи, корпус реактора, образцы-свидетели.

Гарантирование целостности элементов конструкций ответственных промышленных объектов в течение всего срока эксплуатации (в т.ч. и сверхпроектного) – одна из важнейших задач современной прикладной науки. Для толсто-стенных конструкций ключевым ее условием является обеспечение сопротивления внезапному (хрупкому) разрушению. При этом условие достаточной хрупкой прочности (ХП) элемента конструкции с предполагаемым или существующим в нем дефектом имеет вид

$$K_I \leq K_{IC} / k_S, \quad (1)$$

где K_I – расчетный коэффициент интенсивности напряжений (КИН); K_{IC} – статическая трещиностойкость; k_S – коэффициент запаса прочности. Статическая трещиностойкость металла в исходном состоянии существенно зависит от рабочей температуры и в нормативной документации атомной промышленности регламентируется экспоненциальной функцией

$$K_{IC}(T) = A_1 + A_2 \cdot e^{\alpha(T-T_K)}, \quad (2)$$

где A_1 – минимальное значение статической трещиностойкости; A_2 и α – эмпирические коэффициенты; T_K – критическая температура хрупкости (КТХ) металла. Построенную по уравнению (2) кривую индексируют с помощью КТХ в странах, эксплуатирующих водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР), а в западных странах, США и Японии в качестве такого параметра принимают переходную температуру (ПТ) (“*transition temperature*”). Несмотря на методические различия в определении КТХ и ПТ, по физическому смыслу они подобны.

В разных странах мира статическую трещиностойкость металла корпусов реакторов (КР) в исходном состоянии оценивают на основании результатов мно-

гочисленных экспериментов. При этом для адекватного ее определения при высоких температурах испытывают образцы больших размеров (согласно требованиям для обеспечения плоской деформации [1, 2]). Однако отсутствует металл после длительного интенсивного облучения потоком быстрых нейтронов в КР, из которого можно было бы изготовить образцы нужных размеров. Во всем мире используют концепцию температурного сдвига кривой (2) для определения КТХ металла после наработки. При этом зависимость $K_{IC}(T)$ представляют в виде $K_{IC}(T - (T_{K0} + \Delta T_K))$, где T_{K0} – КТХ металла в исходном состоянии, а ΔT_K – ее сдвиг вследствие деградации:

$$\Delta T_K = T_K - T_{K0} \quad (3)$$

Составляющие правой части уравнения (3) принято находить по энергии разрушения образцов Шарпи (не менее 12 штук) при ударном изгибе в выбранном диапазоне температур [3–6]. В атомной энергетике общепринято запас ХП, рассчитываемый по критерию (1), представлять в терминах температуры. Следовательно, определение КТХ металла КР – важный этап оценки его ХП.

Постановка задачи. Действовавшие в СССР нормативные документы по оценке ХП КР не регламентируют разброса значений КТХ. Следовательно, при определении температурного запаса ХП КР не учитывается неопределенность КТХ, полученной экспериментально. Это не совсем корректно, поскольку такая оценка должна выполняться консервативно, т.е. с учетом неопределенности исходных данных. В некоторых странах при этом принимают во внимание разброс ПТ. К примеру, нормы США в запас ХП закладывают неопределенность, связанную с разбросом ПТ металла в исходном состоянии [7].

Недавно в Украине принята методика обработки результатов экспериментов образцов-свидетелей (ОС) [8], которая регламентирует определение сдвига КТХ как верхний 95%-ый доверительный интервал:

$$\Delta T_K^{95\%}(F_n) = \left(A_F + 1,96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \cdot \left(\frac{F_n}{F_0} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где A_F – коэффициент радиационного охрупчивания, вычисляемый по методу наименьших квадратов (МНК) из приближения [3]

$$\Delta T_K(F_n) = A_F \cdot (F_n / F_0)^{1/3}. \quad (5)$$

Здесь σ – стандартное отклонение данных сдвигов КТХ от уравнения (5); n – количество экспериментальных данных; F_n – плотность потока нейтронов, накапливаемого металлом: $F_n = 10^{22}$ neutron/m² – нормировочный коэффициент [3].

Рассмотрим пример определения КТХ [8]. Предположим, что в пяти лабораториях оценили по пять значений КТХ металла сварного шва (СШ) КР в исходном состоянии и после облучения потоком быстрых нейтронов, соответствующего 60 годам эксплуатации. Причем после облучения все лаборатории получили одно и то же значение КТХ: $T_K = 10^\circ\text{C}$ (табл. 1).

Согласно требованиям Государственного научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности (орган надзора в Украине) при определении температуры $T_K(F_n) = T_{K0} + \Delta T_K(F_n)$ необходимо принимать консервативное значение T_{K0} (в данном примере $T_{K0} = 0^\circ\text{C}$). Из формул (4), (5) и данных табл. 1 прогнозируем, что значение КТХ СШ после 60 лет эксплуатации составляет $78,5^\circ\text{C}$ [8].

В Украине для продления ресурса КР энергоблоков №1 Южно-Украинской АЭС (ЮУ АЭС) и №3 Ровенской АЭС использовали методику VERLIFE [9], согласно которой сдвиг КТХ металла вследствие его облучения

$$\Delta T_K(F_n) = A_F \cdot (F_n / F_0)^\beta, \quad (6)$$

где A_F и β – параметры регрессии, найденные с помощью МНК.

Таблица 1. КТХ металла в исходном состоянии и после облучения

Лаборатории	T_{K0} , °C	F_n , 10^{22} neutron /m ²	T_K	ΔT_K
			°C	
1	0	60	10	10
2	-10	60	10	20
3	-20	60	10	30
4	-30	60	10	40
5	-40	60	10	50
$\sigma(T)$	$10\sqrt{2}$		0	$10\sqrt{2}$

60 лет эксплуатации. Как видим, прогнозные значения КТХ [8, 9] не коррелируют с экспериментом ($T_K = 10^\circ\text{C}$), что указывает на несовершенство методик учета разброса КТХ, применяемых для оценки ХП КР. Существует еще один недостаток определения дисперсии КТХ. Каждое значение КТХ металла (в конкретном состоянии) оценивают из результатов испытаний на ударную вязкость определенной группы образцов Шарпи. Для n групп экспериментов получают n значений КТХ и рассчитывают ее дисперсию. Фактически генеральную совокупность экспериментальных результатов разбивают на выборки (группы), для каждой из которых вычисляют КТХ. Однако достоверное значение дисперсии нужно определять из генеральной совокупности данных, а не из какого-то количества выборок из нее. Следовательно, адекватная оценка разброса КТХ и ее учет – актуальная практическая задача.

КТХ определяют, обрабатывая результаты экспериментов на ударную вязкость группы образцов Шарпи. В нормативных документах зависимость энергии их разрушения от температуры аппроксимируется функцией [3, 6, 9–12]

$$E(T) = A + B \cdot \text{th}((T - T_0)/C), \quad (7)$$

где A , B , C и T_0 – эмпирические константы, вычисляемые с помощью МНК; T – температура. КТХ рассчитывают из выражения (7) как температуру, которая соответствует фиксированному уровню энергии разрушения, регламентированному нормативным документом (в частности, этот уровень зависит от предела текучести стали и в большинстве случаев равен 47 J [3], а в [9–12] принят равным 41 J).

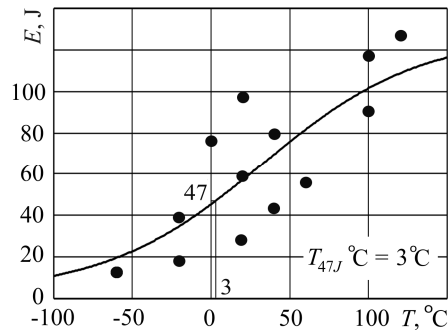
Используя результаты исследований ударной вязкости реакторных сталей при криогенных температурах [13], можно уменьшить количество констант приближения (7) до трех. В частности, установлено, что нижний шельф ударной вязкости стандартных образцов Шарпи составляет 2,7 J. Это упрощение вошло в российскую методику обработки результатов испытаний ОС КР [14].

Аппроксимация данных экспериментов с помощью аналитической функции практически всегда связана с некоторым их отклонением от приближения. Результаты испытаний на ударную вязкость группы облученных в реакторе потоком быстрых нейтронов ОС металла СШ № 3 КР энергоблока № 1 ЮУ АЭС [15], а также определенная по этим данным КТХ ($T_{47J} = 3^\circ\text{C}$) приведены на рис. 1. Большой разброс точек относительно кривой очевиден, следовательно, КТХ имеет какие-то доверительные интервалы. Однако современные нормативные документы по оценке ХП КР регламентируют строго определенное ее значение. Очевидно, что такой подход некорректен.

В соответствии с [9] к сдвигу КТХ (6) необходимо прибавить стандартное отклонение $\sigma(T_K)$. Если после этого кривая (6) не огибает все значения сдвигов КТХ, то ее смещают вертикально вверх до огибания всех точек. Аналогичная поправка регламентирована и для величины T_{K0} [9]. При отсутствии данных для вычисления стандартного отклонения КТХ металла в исходном состоянии, его принимают равным 10°C для основного металла (ОМ) и 16°C – для металла СШ. По данным табл. 1 рассчитали прогнозное (64°C) значение КТХ металла СШ для

Рис. 1. Температурная зависимость энергии разрушения E образцов-свидетелей сварного шва № 3 корпуса реактора энергоблока № 1 ЮУ АЭС [15] и их аппроксимация функцией (7).

Fig. 1. Temperature dependence of fracture energy E of weld № 3 specimens-witnesses of the unit 1 RPV of the South Ukrainian NPP [15] and approximation of these data by function (7).



Яркий пример разброса значений КТХ получен в рамках проекта МАГАТЭ [16], в котором приняли участие восемь организаций из разных стран мира (РНЦ КИ, Прометей – Россия; Nuclear Research Institute – Чехия; KFK Atomic Energy Research Institute – Венгрия; ORNL – США; EC Joint Research Centre Institute for Energy – Европейский Союз; Bhabha Atomic Research Centre – Индия; Institute of Metal Science – Болгария). Каждой из них для одного и того же ОМ и одного о того же металла СШ КР в исходном состоянии определено по одному значению КТХ (по критерию T_{41J}). Соответствующие результаты всех лабораторий разные. Например, для ОМ максимальное значение составило -49°C (Венгрия), а минимальное – (-103°C) (Прометей). Объединенные результаты всех лабораторий для ОМ дают $T_{41J} = -83^\circ\text{C}$. Если бы каждая из них оценила ХП КР, учитывая только собственные данные, то результаты отличались бы. Однако никто из участников проекта даже не инициировал исследований по определению разброса КТХ [16].

При планировании испытаний по ударной вязкости и обработке их результатов возникает серьезная проблема – достаточность экспериментальных данных для возможности построения кривой (7) вообще и доверительного определения КТХ в частности. Для получения аппроксимации (7) не столь важно само количество экспериментальных точек, как их взаимное расположение. Ведь при аппроксимировании данных нелинейной функцией (7) степень влияния разных экспериментальных точек на КТХ разная. Если экспериментальной точке, находящейся вблизи верхней или нижней асимптоты, придать некий прирост, то результирующая КТХ изменится намного меньше, чем при таком же приросте точки вблизи уровня энергии, по которому определяют КТХ.

Нормативные документы по определению КТХ регламентируют только минимальное необходимое количество данных (например, в актуальных нормах для ВВЭР указано, что для получения достоверного значения КТХ необходимо испытать не менее 12 образцов [3, 8, 13 и 14]), а о планировании экспериментов и физическом обосновании критериев их достаточности они вообще не упоминают.

Отсюда цель работы – установить степень влияния (веса) каждого отдельного экспериментального значения ударной вязкости на определяемое значение КТХ; установить количественную меру достаточности данных по ударной вязкости для получения адекватного значения КТХ; определить разброс значений КТХ, исходя из разброса значений ударной вязкости, учитывая при этом вес каждой точки.

Разработка метода. Методы, созданные в настоящей работе, основываются на развитии ранее изложенных идей [17]. В математической статистике мерой разброса данных по отношению к аппроксимирующей функции является стандартное отклонение

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y(x_i))^2}{N}}, \quad (8)$$

где x_i и y_i – данные наблюдений; $y(x)$ – аппроксимирующая функция.

Очевидно, что вычислить характеристику (8) для экспериментальных значений (E_i, T_i) в приближении (7) не сложно. Но полученная так величина имеет размерность энергии разрушения, а цель работы – определить эту характеристику для КТХ. Если найти функцию $T(E)$, обратную функции (7)

$$T(E) = T_0 + C \cdot \text{arctg}((E - A)/B), \quad (9)$$

то оценить дисперсию данных (E_i, T_i) прямым использованием формулы (8) невозможно, поскольку некоторые экспериментальные значения E_i находятся вне области определения функции (9). Поэтому для разработки метода расчета разброса значений КТХ необходимо вначале решить вспомогательную задачу, т.е. определить изменение аппроксимирующей функции для данных (x_i, y_i) , $i = \overline{1, N}$ при приращении $y_N = y_N + \Delta$.

Тестовая задача № 1. Экспериментальные результаты нужно аппроксимировать функцией-константой $y(x) = a$. Для простоты примем идеализированный вариант данных: $y_i = M$, $\forall i = \overline{1, N}$, как показано на рис. 2а. Дадим прирост Δ последней точке и определим, насколько изменится функция в ней.

Используя МНК, нетрудно установить, что в первом случае $a = M$, а во втором $a = M + \Delta/N$. Следовательно, при аппроксимировании экспериментальных данных функцией-константой и предоставлении какой-то точке прироста на величину Δ , аппроксимирующая функция в этой точке изменится на величину Δ/N . Она характеризует степень влияния одной точки на изменение функции от аргумента этой точки.

Тестовая задача № 2. Аппроксимация линейной функцией $y(x) = ax + b$. Для простоты математических преобразований предположим, что существует $N/2$ точек, в которых $x_i = y_i = 0$ и, соответственно, $N/2$ точек, где $x_i = k$, $y_i = 2 \cdot k$ (рис. 2б). С помощью МНК получаем $a = 2$ и $b = 0$.

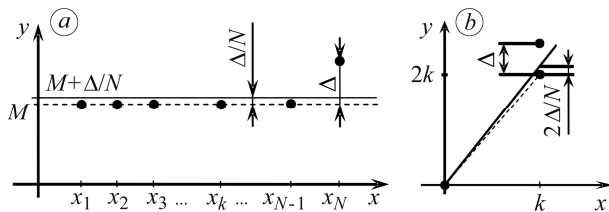


Рис. 2. Иллюстрация данных к тестовым задачам № 1 и 2.

Fig. 2. Illustration of data to the test problems № 1 and 2.

Как и в задаче № 1, дадим прирост Δ последней точке и определим изменение функции в ней. После простых арифметических преобразований получим $a = 2 + 2\Delta/Nk$ и $b = 0$. Значение этой функции при $x = k$ станет равным не $2k$, а $2k + 2\Delta/N$, т.е. ее изменение в этой точке составляет уже $2\Delta/N$.

Следовательно, в зависимости от количества констант изменение аппроксимирующей функции в какой-то экспериментальной точке при предоставлении ей прироста Δ

$$\Delta f = \Delta \cdot \frac{n_c}{N}, \quad (10)$$

где n_c – количество констант аппроксимирующей функции.

Несмотря на то, что справедливость уравнения (10) доказана только для линейных функций с одной и двумя константами, примем, что это допущение справедливо для всех функций. Ведь математически доказать утверждение (10) для нелинейных функций типа (7), константы которых даже с помощью МНК можно найти только итерационным способом, невозможно. Справедливость уравнения (10) для функции (7) продемонстрируем на численных тестовых примерах.

Очевидно, что в обратной задаче (предсказать отклонение точки по известному

изменению функции) решение обратно (10):

$$\Delta = \frac{N}{n_c} \cdot \Delta f. \quad (11)$$

Введем понятие чувствительности точки на определяемую КТХ δT_{Ki} . Найдем ее как изменение КТХ при единичном изменении энергии разрушения, т.е. $\delta T_{Ki} = \partial T_K / \partial E_i$ с размерностью [°C/J]. Она зависит от количества точек и констант аппроксимирующей функции. Пусть существует “идеальный” набор экспериментальных данных, точно описываемых зависимостью (9), для которого $\sigma(E) = 0$ (рис. 3). Тогда для определения δT_{Ki} необходимо: 1) найти константы уравнения (7) для экспериментальных данных (E_i, T_i) с помощью МНК и рассчитать КТХ по формуле (9); 2) придать прирост в 1 J какому-то одному значению $E(T_i)$ и для вновь полученного набора данных выполнить предыдущие шаги; 3) определить δT_{Ki} как разность между значениями КТХ, полученными при выполнении первого и второго шагов; 4) выполнить второй и третий шаги для всех точек.

На рис. 4 построена зависимость δT_{Ki} от температуры, полученная для данных на рис. 3. Для наглядности значения δT_{Ki} нормировали относительно значения в точке с максимальной чувствительностью. Иллюстрация количественно подтверждает предположение о разной степени влияния разных экспериментальных точек на КТХ. Наиболее ощутимо влияние точек, энергия разрушения в которых наиболее близка к значению, по которому определяют КТХ, а наименее – близких к горизонтальным асимптотам на кривой (9).

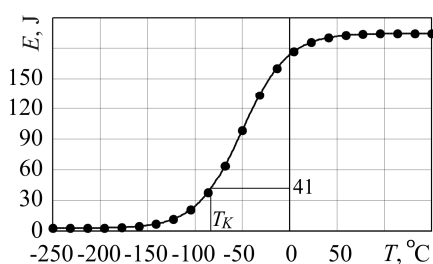


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Набор данных энергии разрушения E образцов Шарпи в зависимости от температуры испытаний T .

Fig. 3. The dataset of Charpy specimens fracture energy E depending on test temperature T .

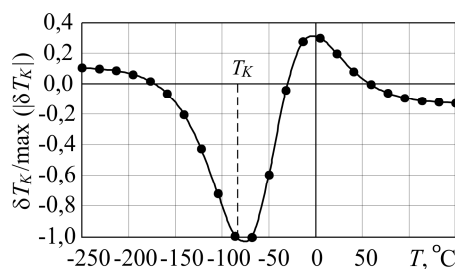


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Кривая, характеризующая степень важности каждого из значений ударной вязкости для определения КТХ.

Fig. 4. Curve, characterizing the importance of each value of impact toughness for evaluation of critical brittleness temperature (CBT).

Для произвольных наборов экспериментальных значений ударной вязкости, по которым можно построить функцию (9), кривая, характеризующая степень важности каждого из ее значений для определения КТХ, по форме будет качественно подобна кривой на рис. 4.

Введем понятие наблюдаемого отклонения каждой экспериментальной точки от среднего значения КТХ как произведение чувствительности i -ой точки на разность энергий между экспериментом и аппроксимирующей функцией (9):

$$\Delta T_i = \delta T_{Ki} \cdot (E(T_i) - E_i) \quad [^\circ\text{C}]. \quad (12)$$

Учитывая реальное количество экспериментальных точек и констант аппроксимирующей функции, в соответствии с установленным правилом (11) можем определить истинное отклонение i -ой экспериментальной точки от КТХ:

$$\Delta T_{Ki} = \frac{N}{n_c} \cdot \delta T_{Ki} \cdot (E(T_i) - E_i). \quad (13)$$

Эту разность (13) используем для нахождения разброса значений КТХ.

Введем еще одно понятие – количественную меру веса i -ой точки из серии N экспериментов, по которым определяется КТХ. Умножив чувствительность точки δT_{Ki} на количество точек и пронормировав полученное значение относительно произведения количества точек на максимальную чувствительность, получим относительную количественную меру веса точки:

$$w_i = \frac{N \cdot |\delta T_{Ki}|}{\max(N \cdot |\delta T_K|)}. \quad (14)$$

Суммируя меры веса всех точек, найдем некую количественную характеристику набора экспериментальных данных по ударной вязкости – эффективное количество точек

$$N_{eff} = \sum_{i=1}^N w_i = \frac{\sum_{i=1}^N N \cdot |\delta T_{Ki}|}{\max(N \cdot |\delta T_K|)}, \quad (15)$$

которая описывает эффективность совокупности данных по ударной вязкости для определения КТХ. Используя ее, сформулируем количественный критерий достаточности данных для получения КТХ:

$$N_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^N N \cdot |\delta T_{Ki}|}{\max(N \cdot |\delta T_K|)} \geq [N_{eff}]. \quad (16)$$

После обработки большой базы данных экспериментов ОС КР ВВЭР-1000 на украинских АЭС в качестве критериального значения их достаточности можно принять $N_{eff} = 4$. Заметим, что для данных на рис. 3 $N_{eff} = 5,78$.

Критерий (16) полезен при планировании экспериментов на ударную вязкость. Чтобы получить точку с наибольшим весом, определив верхний шельф энергии разрушения, выполняют еще несколько экспериментов. При этом каждый раз получают аппроксимирующую кривую (7). Если критерий (16) удовлетворяется, то необходимое условие адекватного определения КТХ выполнено.

Имея истинное отклонение между экспериментом и аппроксимацией функцией в значениях КТХ (13) и меру веса каждой отдельной точки (14), можно записать квадрат разности между экспериментом и аппроксимационной функцией в значениях КТХ с учетом веса точки:

$$\frac{N \cdot |\delta T_{Ki}|}{\max(N \cdot |\delta T_K|)} \left(\frac{N}{n_c} \cdot \delta T_{Ki} \cdot (E(T_i) - E_i) \right)^2. \quad (17)$$

Подставив выражение (17) в числитель классической формулы (8), а эффективное количество точек (15) – в знаменатель, после сокращений получаем дисперсию КТХ:

$$\sigma_{adj}(T_K) = \frac{N}{n_c} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (|\delta T_{Ki}| \cdot (\delta T_{Ki} \cdot (E(T_i) - E_i))^2)}{\sum_{i=1}^N |\delta T_{Ki}|}}. \quad (18)$$

Характеристику $\sigma_{adj}(T_K)$ назовем приведенным стандартным отклонением КТХ.

Валидация метода. Предложенный метод определения разброса КТХ апробирован на многих модельных задачах. К примеру, допустим, что 24 образца из

одного и того же металла КР случайно поделили поровну и отправили в лаборатории А и В, каждая из которых получила свой “идеальный” набор данных. Причем, если один из них горизонтально сместить влево на 30°C, то они совпадут. Очевидно, что КТХ обеих лабораторий отличаются на 30°C, а стандартное отклонение, найденное по двум значениям КТХ, равно 15°C.

Воспользовавшись предложенным методом для набора данных обеих лабораторий, получили: $\sigma_{adj}(T_K)=17,34^\circ\text{C}$; $N_{eff}=8,52$. Приведенное стандартное отклонение $\sigma_{adj}(T_K)=17,34^\circ\text{C}$ хорошо коррелирует с $\sigma=15^\circ\text{C}$, рассчитанным по классической формуле (8), что свидетельствует об адекватности разработанного метода.

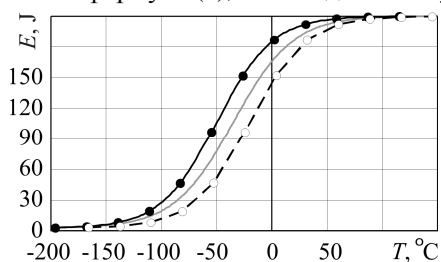


Рис. 5. Наборы “идеальных” данных лабораторий А (●) и В (○) и соответствующие им аппроксимации (7).

Fig. 5. The “perfect” dataset of A (●) and B (○) laboratories and their approximations using dependence (7).

Аналогичные подтверждения получены и на других тестовых задачах. С помощью соотношений (10) и (11) найдены адекватные значения среднеквадратического отклонения. Следовательно, они справедливы и для функции (7) с тремя константами (значение нижнего шельфа ударной вязкости во всех задачах принимали 2,7 J). Поэтому логично считать, что выражение (10) справедливо и для других функций, используемых в инженерных расчетах.

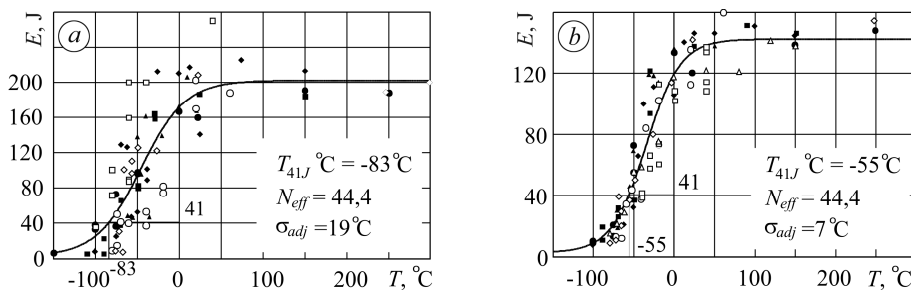


Рис. 6. Обобщенные данные семи (a) и восьми (b) лабораторий по ударной вязкости основного металла (a) и металла сварного шва (b) КР ВВЭР-1000 [16], а также результирующие температурные зависимости энергии разрушения образцов Шарпи E , полученные с использованием предложенных подходов. (Обозначения см. табл. 2).

Fig. 6. Summarized data of seven (a) and eight (b) test laboratories on impact toughness of the base (a) and weld metal (b) of WWER-1000 reactor body [16] and resulting temperature dependences of Charpy specimens fracture energy E , obtained by the proposed approaches. (Designations as in Table 2).

На рис. 6 приведены обобщенные данные по ударной вязкости ОМ и металла СШ КР ВВЭР-1000 соответственно, полученные в рамках проекта МАГАТЭ [16], а также характеристики $\sigma_{adj}(T_K)$ и N_{eff} , рассчитанные по предложенным формулам. Испытано 89 образцов Шарпи ОМ и 93 – металла СШ. Отметим, что для контроля КТХ металла КР ВВЭР-1000 в исходном состоянии предусмотрено две группы ОС (по 36 образцов из ОМ и металла СШ) [18]. Кроме того, на заводе-изготовителе проверяют соответствие КТХ металла КР техническим условиям, используя для этого не более 36 образцов, т.е. выборка образцов в исходном состоянии [16] более представительна, чем выборка любого КР ВВЭР-1000.

В табл. 2. приведены КТХ, полученные каждым исполнителем проекта [16], а также стандартные отклонения $\sigma(T_K)$, рассчитанные по классической формуле

(8). Из сравнения стандартных отклонений и полученных по формуле (18) их приведенных значений (см. рис. 6) очевидна их корреляция.

Таблица 2. КТХ металла КР из разных лабораторий [17]

Исполнитель	$T_K, ^\circ\text{C}$	
	ОМ	СШ
США (●)	-91	-62
Чехия (■)	-70	-58
РНЦКИ (◆)	-81	-53
ЕС (▲)	-70	-58
Венгрия (○)	-49	-50
Прометей (□)	-103	-40
Индия (◇)	-71	-52
Болгария (△)	-	-54
$\sigma(T_K)$	16,05	6,22

Данные о КТХ ОМ и металла СШ КР ВВЭР-1000 [16] сравнили с нормальным законом распределения вероятностей, построенным на значениях T_K (использовали как математическое ожидание) и $\sigma_{adj}(T_K)$ (применяли как дисперсию) (рис. 7). При нанесении значений КТХ отдельных лабораторий на рис. 7 предполагали, что каждое из них равновероятно. Видна хорошая корреляция между нормальным законом распределения, построенным с использованием предложенного приведенного стандартного отклонения КТХ (19), и экспериментальными данными всех участников проекта [16]. Таким образом, адекватность предложенного метода подтверждена также результатами апробации

на базе большой выборки данных испытаний образцов Шарпи из ОМ и металла СШ КР ВВЭР-1000 [16].

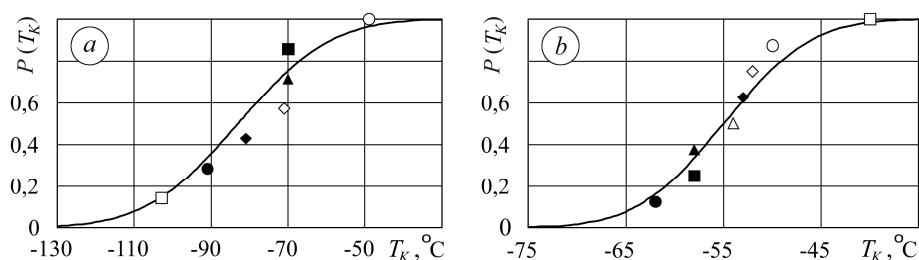


Рис. 7. Сравнение значений КТХ T_K из различных лабораторий (обозначения соответствуют рис. 6) с нормальным законом распределения вероятностей $P(T_K)$, построенным на базе полученных в настоящей работе значений T_K и $\sigma_{adj}(T_K)$: а – ОМ; б – металл СШ.

Fig. 7. Comparison of CBT T_K values, obtained in different laboratories (designations as in Fig. 6) and normal probability distribution law $P(T_K)$, plotted on the base of the obtained values T_K and $\sigma_{adj}(T_K)$: а – VM; б – weld metal.

Актуальные нормативные документы для определения КТХ требуют проведения не менее 12 испытаний [3, 8, 9, 14]. Но этого может быть недостаточно, Поскольку не так важно количество экспериментальных точек, сколько их совокупность и взаимное расположение относительно друг друга (рис. 8). Такая ситуация не редко возникает при обработке данных штатных комплектов лучевых ОС КР.

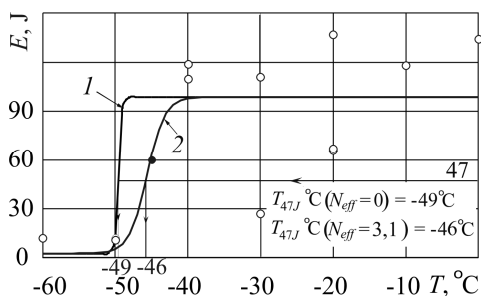


Рис. 8. Экспериментальные данные по ударной вязкости (○) металла СШ парогенератора энергоблока ЮУ АЭС, а также КТХ при разном эффективном количестве точек [19]: 1 – $N_{eff} = 0$; 2 – 3,1.

Fig. 8. Experimental impact toughness data (○) of the weld metal of power unit of steam generator of the South Ukrainian NPP and also CBT at different effective number of points [19]: 1 – $N_{eff} = 0$; 2 – 3.1.

Если же к реальным данным добавить всего одно фиктивное значение (черная точка на рис. 8) вблизи значения энергии, по которому определяют КТХ, то

эффективное количество точек резко возрастет. Это наглядно подтверждает важность именно тех значений энергии разрушения образцов Шарпи среди всех экспериментальных данных, по которым определяют КТХ.

Таблица 3. Значения КТХ для ОС металла СШ КР двух блоков ЮУ АЭС

Блок	Тип ОС	Группа ОС	$T_K, ^\circ\text{C}$	N	$\sigma_{adj}(T_K), ^\circ\text{C}$	N_{eff}
№ 1	Без облучения	1	-22,1	12	13,9	5,4
		2	-46,4	12	7,9	5,7
	2Л	1	-4,7	9	4,3	3,6
		2	-4,2	7	2,0	3,5
	3Л	1	-7,5	6	2,8	4,8
		2	11,6	6	3,7	3,5
		3	18,2	6	13,9	4,1
	3Л _{рек}	1	-8,6	16	4,4	10,2
		2	15,0	12	6,8	5,5
		3	4,16	13	26,1	7,5
№ 2	Без облучения	1	-43,7	13	18,8	5,9
	1Л _{рек}	1	15,9	12	3,8	5,4
		2	29,3	12	3,1	6,4
	2Л	1	6,6	12	12,3	8,7
		2	20,2	13	8,8	7,5

Примечание. Л – лучевой комплект ОС; цифра перед Л – номер выгрузки из реактора; Л_{rest} – при определении КТХ использованы, также и реконструированные ОС.

С помощью предложенного метода обработаны экспериментальные данные по ударной вязкости ОС металла СШ напротив активной зоны КР энергоблоков № 1 и 2 ЮУ АЭС. Значения КТХ и их разброс, а также эффективное количество точек приведены в табл. 3. Как видим, приведенное стандартное отклонение КТХ металла КР в облученном состоянии достигает 26°C. Следовательно, при расчетах ХП КР необходимо учитывать дисперсию КТХ. Отметим, что использование технологии реконструкции ОС увеличивает эффективное количество точек. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости доработки нормативной базы Украины для планирования и обработки результатов экспериментов на ударную вязкость ОС КР, а также оценки степени охрупчивания металла КР.

ВЫВОДЫ

Разработан физически обоснованный метод определения разброса КТХ на основе экспериментальных данных по ударной вязкости образцов Шарпи, который базируется на введенной и определенной мере влияния каждой экспериментальной точки из набора данных на определяемую величину КТХ. Его адекватность подтверждена результатами тестовых задач и апробацией на большом массиве данных по ударной вязкости ОМ и металла СШ КР ВВЭР-1000, полученном в рамках международного проекта МАГАТЭ. Введено понятие эффективного количества точек как характеристики выборки данных по ударной вязкости ОС для определения на их основе КТХ. Эту характеристику можно использовать для обоснования критерия достаточности экспериментальных данных по ударной вязкости для адекватного определения КТХ.

РЕЗЮМЕ. Запропоновано оригінальний фізично обґрунтований метод визначення розкиду значень критичної температури крихкості (КТК). Принциповою його відмінністю і перевагою (порівняно зі стандартним) є те, що розкид даних визначають не з набору значень КТК, а із первинних, за якими обчислюють КТК. Введено кількісні характеристики серії експериментів на ударну в'язкість для визначення КТК: ефективну кількість експериментальних точок та вагу (міру впливу) кожної з них на КТК. Запропоновано також критерій достатності кількості значень ударної в'язкості для адекватного визначення КТК. Описано численні експерименти, які продемонстрували добру кореляцію розкиду значень КТК, отриманих згідно із запропонованим методом, і відповідних стандартних відхилень.

SUMMARY. The original physically grounded method for evaluation of the value scattering of critical brittleness temperature (CBT) is proposed. Its principal difference and advantage to compare with the standard one, is the fact that data scattering is determined not from the estimated CBT data values, but from the original measuring dataset. The numerical characteristics of a series of impact toughness tests for determination of CBT are introduced: the effective number of experimental points and significance (measure of effect) of each of them under evaluation of CBT. The criterion of the sufficient number of impact toughness values is proposed to obtain reliable CBT values, obtained by the proposed method and corresponding standard deviations.

1. *ГОСТ 25.506-85.* Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 66 с.
2. *ASTM E399-12e3.* Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials. – Philadelphia: ASTM, 2012 – 33 p.
3. *ПНАЭ Г-7-002-86.* Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 526 с.
4. *МТ-Д.0.03.391-09.* Методика оценки прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР в процессе эксплуатации. – К.: Минтопэнерго Украины, 2009. – 66 с.
5. *IAEA-TECDOC-1627.* Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment Deterministic Evaluation for the Integrity of Reactor Pressure Vessel. – Vienna: IAEA, 2010. – 230 p.
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, “Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components”. – New York: ASME, 2004.
7. *10 CFR 50.61.* Title 10 Code of Federal Regulations, Part 50.61, Fracture Toughness Requirement for Protection Against Pressurized Thermal Shock Events. – Washington, DC: NRC, 2013.
8. *ММ-Т.0.03.120-08.* Типовая программа контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям. – К.: ГП НАЭК ЭНЕРГОАТОМ, 2008. – 36 с.
9. *Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs, “VERLIFE”* Version 2008. – 276 p.
10. *Regulatory Guide 1.99, Revision 2, Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials,* Office of Nuclear Regulatory Research. – Washington, DC: NRC, 1998.
11. *KTA 3203 (6/01).* Safety Standards of the Nuclear Safety Standards Commission (KTA). Surveillance of the Irradiation Behaviour of Reactor Pressure Vessel Materials of LWR Facilities. – Salzgitter: KTA, 2001. – 16 p.
12. JSME Codes for Nuclear Power Generation Facilities, S NC1-2001, “Rules on Design and Construction for Nuclear Power Plant”. – Tokyo: JSME, 2001.
13. *Nanstad R. K., McCabe D. E. and Swain R. L.* Evaluation of Variability in Material Properties and Chemical Composition for Midland Reactor Weld WF-70 // Effects of Radiation on Materials. ASTM STP 1325. – Philadelphia: ASTM, 1999. – P. 125–156.
14. *РД ЭО 0598-2004.* Методика определения критической температуры хрупкости материалов корпусов реакторов по результатам испытаний малоразмерных образцов на ударный изгиб. – М.: Росэнергоатом, 2004. – 12 с.
15. *Отчет о выполнении работ: “Реконструкция и испытания реконструированных образцов-свидетелей КР ВВЭР-1000 типа Шарпи и COD на статическую вязкость разрушения и ударный изгиб. Этап 3. Испытания облученных реконструированных ОС типа Шарпи и COD энергоблока ЮУ АЭС-1 (комплект 3Л)”.* – К.: ИЯИ НАНУ, 2010. – 82 с.
16. *IAEA-TECDOC-1441* Effects of nickel on irradiation embrittlement of light water reactor pressure vessel steels. – Vienna: IAEA, 2005. – 64 p.
17. *Orynyak I., Zarazovskii M., and Bogdan A.* Determination of the Transition Temperature Scatter Using the Charpy Data Scatter // Proc. ASME. 2013 Pressure Vessels and Piping Conf. Paper № PVP2013-97697. – 6 p.
18. *1152.75.00.000 TO.* Образцы-свидетели. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1979. – 60 с.
19. *Отчет о выполнении работы по теме “Комплексные лабораторные исследования для определения фактических физико-механических свойств металла узла в зоне СШ № 111”.* – К.: НТЦ НАЭК ЭНЕРГОАТОМ, 2013. – 224 с.

Получено 18.03.2014