

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 621.039.536.2:539.4

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ МЕТАЛЛА КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПО ДАННЫМ ИСПЫТАНИЙ НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ

© А. Г. Казанцев¹, В. М. Маркочев², Б. А. Сугирбеков¹*Статья поступила 22 марта 2016 г.*

На основе статистического моделирования (методом Монте-Карло) выполнены численные эксперименты по определению критической температуры хрупкости T_k согласно методикам ПНАЭ Г-7-002-86 и РД ЭО 0598-2004. Используемые в расчетах данные испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи (с V-надрезом) получены на более чем 1200 образцах стали 15Х2НМФАА, вырезанных из различных зон по толщине, высоте и в окружном направлении обечайки корпуса реактора ВВЭР-1000. Испытания проведены в диапазоне температур от -95 до $+20$ °С. На основе статистических критериев показано, что материал обечайки корпуса реактора может рассматриваться как однородный. Установлено, что значения энергии разрушения ударных образцов в области хрупковязкого перехода распределены по бимодальному закону, найдены параметры распределений при различных уровнях температуры. На основе статистического моделирования определены законы распределения критической температуры хрупкости. Показано, что средние значения T_k , установленные по ПНАЭ Г-7-002-86, примерно на 10 °С выше, чем полученные по РД ЭО 0598-2004. Выявлены границы интервалов, в которые с 90 %-й вероятностью попадают значения критической температуры хрупкости в зависимости от числа испытанных образцов и схемы испытаний. Даны рекомендации по совершенствованию методики определения критической температуры хрупкости.

Ключевые слова: ударная вязкость; статистика; хрупковязкий переход; критическая температура хрупкости; статистическое моделирование; метод Монте-Карло.

Одной из основных характеристик, используемых при оценке качества металла корпуса реактора (КР) АЭС, является критическая температура хрупкости T_k . Существует несколько методик ее определения. В действующих в атомной энергетике нормативных отраслевых методиках величина T_k находится по ударной вязкости и доле вязкой составляющей в изломе образца (сдаточные заводские испытания [1]) или только по ударной вязкости или работе разрушения (при испытании образцов-свидетелей [2] в процессе эксплуатации). Для оценки T_k допускается испытывать ограниченное число образцов на каждый уровень температуры (1 – 3 шт.) или 10 – 20 — на всю серийную кривую, что не достаточно обосновано статистически.

В данной работе с использованием метода статистического моделирования (метода Монте-Карло) проведены численные эксперименты по определению критической температуры хрупкости обеими методиками и выполнена оценка достоверности получаемых значений T_k .

Для установления статистических характеристик рассеяния обработан большой массив данных испытаний на ударный изгиб — более 1200 образцов Шарпи (размерами $10 \times 10 \times 55$ мм с V-образным надрезом). Образцы для испытаний вырезали в тангенциальном направлении из опытно-штатной обечайки активной зоны корпуса реактора ВВЭР-1000 из стали 15Х2НМФАА. Механические свойства металла, полученные при статическом растяжении следующие: $\sigma_B = 608$ МПа; $\sigma_{0,2} = 490$ МПа; $\delta = 15$ %; $\psi = 55$ %.

Обечайку (рис. 1) разрезали на две части по высоте и затем сваривали кольцевым швом. Полученную сварную обечайку разрезали на темплеты для исследования механических свойств в соответствии со схемой, представленной на рис. 1. Образцы на ударный изгиб изготавливали из колец Б (темплеты Б1, Б11, Б21), Е (темплеты Е1, Е11, Е21, Е6, Е16, Е26), И (темплеты И, И1, И21) соответственно верхней, средней и нижней частей по высоте обечайки. Темплеты из колец Б и И вырезали в сечениях, расположенных с шагом 120° в кольцевом направлении, из кольца Е — с шагом 60° . Заготовки для образцов располагались в нескольких слоях (от 3 до 10) по толщине обечайки.

¹ НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия;
e-mail: kazantsev_a_g@mail.ru

² НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия.

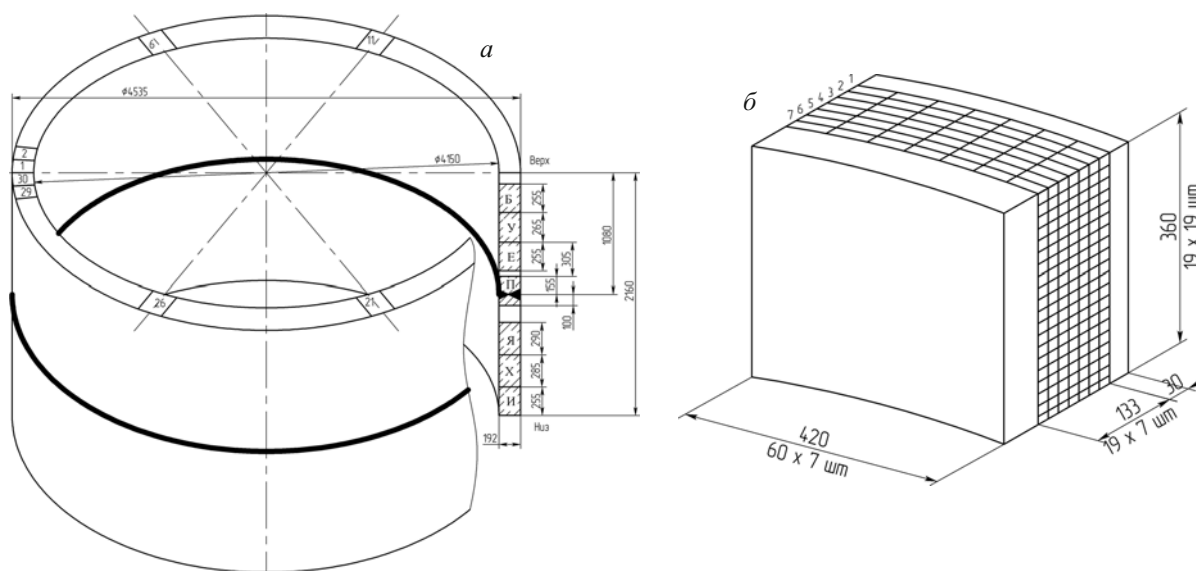


Рис. 1. Схема разрезки обечайки корпуса реактора (а) и разрезки темплетов на заготовки для тангенциальных ударных образцов (б)

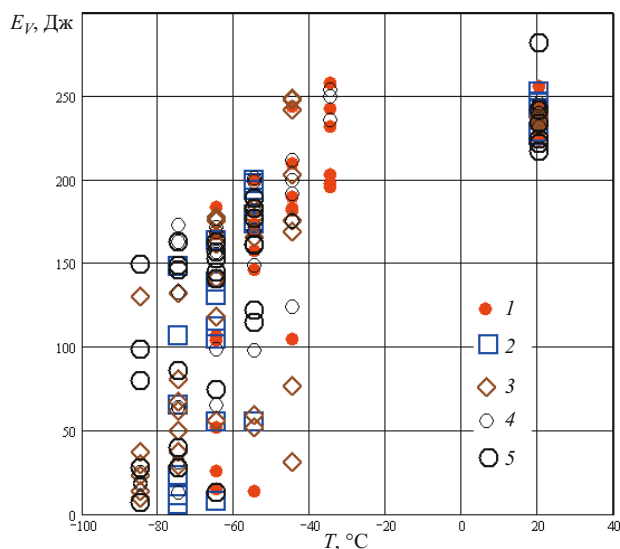


Рис. 2. Результаты испытаний на ударную вязкость металла различных по толщине слоев темплета E_T : 1 — слои 1 и 2; 2 — слои 3 и 4; 3 — слои 5 и 6; 4 — слои 7 и 8; 5 — слои 9 и 10 (нумерация слоев начинается от внутренней поверхности)

Длина темплетов составляла около 400 мм, высота — около 300 мм. Металл самой верхней части обечайки длиной около 100 мм (пробное кольцо) не использовали.

Испытания проводились при девяти уровнях температуры в диапазоне от +20 до -95 °С. Общее число испытанных на одном уровне температуры образцов — от 50 до 200 °С.

Для оценки однородности свойств металла обечайки сначала были проанализированы свойства отдельных темплетов. В силу ограниченных размеров темплетов по длине и высоте полагали, что в пределах каждого из них изменением свойств металла в окружном направлении и по высоте обечайки можно пренебречь. Для оценки однородности по толщине ре-

зультаты испытаний образцов, вырезанных из двух рядов соседних по толщине слоев каждого темплета, объединяли по температурам в выборки.

С использованием непараметрического рангового критерия Краскела – Уоллиса выполнили проверку принадлежности указанных выборок единой генеральной совокупности (своей для каждой температуры). Статистикой данного критерия служит величина

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^m \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1), \quad (1)$$

где n — общее число испытанных образцов при заданной температуре; m — число выборок; i — номер выборки; n_i — число образцов в i -й выборке; R_i — сумма рангов i -й выборки. Для определения ранга выборки строили вариационный ряд. Ранг R_i , характеризующий равномерность перемешивания случайных величин, вычисляли как сумму порядковых номеров членов ряда, принадлежащих i -й выборке. Величина H при $n_i > 5$ и $m > 4$ распределена по закону χ^2 с $k = m - 1$ степенями свободы [3]. Использование данного критерия обусловлено тем, что он применим к распределениям, не являющимся нормальными, и не требует равенства размеров выборок.

Обработка данных показала, что для всех выборок, отвечающих указанным выше требованиям по числу образцов, условие $H \leq \chi_\alpha^2$ выполняется при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Из этого следует вывод о тождественности генеральных распределений значений энергии разрушения (ударной вязкости) для фиксированных температур независимо от расположения зоны вырезки по толщине темплета, т.е. металл в объеме каждого исследованного темплета может рассматриваться как однородный. Иллюстрацией к этому выводу является рис. 2, из которого видно, что резуль-

таты испытания образцов, вырезанных из разных слоев по толщине темплета Е1, достаточно равномерно распределены и лежат примерно в одной полосе разброса.

Далее провели анализ данных, полученных на вырезанных в различных зонах по высоте и окружности обечайки темплетях. Всего рассмотрены 92 выборки по темплетам и температурам.

Оценка этих выборок с использованием критерия (1) с вероятностью 95 % показала их принадлежность единой генеральной совокупности, что подтвердило однородность металла всей обечайки [4]. С учетом этого все результаты испытаний объединили по температурам в один массив значений работы разрушения E_V (рис. 3).

Анализ изломов ударных образцов показал, что при температуре $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$ все разрушения вязкие, при $-95\text{ }^\circ\text{C}$ — хрупкие. В переходной области имеет место бимодальное распределение — точки группируются около двух центров, соответствующих вязкому и хрупкому разрушениям (кривые 1 и 2 на рис. 3). На рис. 4 приведены гистограммы относительных частот W (отношения числа попаданий в заданный интервал значений энергии разрушения к объему выборки) для температур испытаний, при которых преобладают различные механизмы разрушения — вязкий, смешанный и хрупкий.

Необходимо отметить, что бимодальность распределения характеристик механических свойств в области температур хрупковязкого перехода является проявлением достаточно общей закономерности и наблюдается не только для работы разрушения (или ударной вязкости), но и других характеристик, например [5, 6], для относительного удлинения.

Причиной этого является структурная неоднородность металла и возможность перехода в хрупкое состояние разных структур при различных температурах. Хрупкий характер разрушения наблюдается в том случае, если перед фронтом растущей трещины расположены преимущественно хрупкие структурные фазы [7]. Для построения гистограмм бимодального распределения требуется значительное число образцов (70 – 80 шт.) на каждый уровень температуры [7].

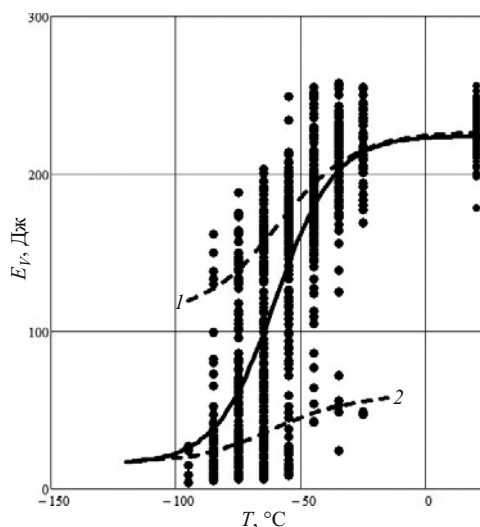


Рис. 3. Результаты испытаний на ударную вязкость стали 15X2NMFAA: 1 — верхняя мода; 2 — нижняя мода

Интегральное бимодальное распределение значений ударной вязкости описывали с использованием функции в виде двух слагаемых:

$$F(x, a_1, s_1, a_2, s_2, \gamma) = F_1(x, a_1, s_1)\gamma + F_2(x, a_2, s_2)(1 - \gamma). \quad (2)$$

Выражения для F_1 и F_2 могут быть представлены в виде функций нормального или дробно-степенного распределения [8]. В последнем случае соотношение (2) с учетом зависимости указанных выше параметров от температуры можно записать в виде

$$F(x, T) = \frac{\gamma(T)}{1 + [x/a_1(T)]^{-s_1(T)}} + \frac{1 - \gamma(T)}{1 + [x/a_2(T)]^{-s_2(T)}}, \quad (3)$$

где a_1, a_2 и s_1, s_2 — параметры, характеризующие математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение; величина γ соответствует весовому вкладу каждого слагаемого в суммарное распределение.

Результаты статистической обработки данных испытаний на ударную вязкость представлены в табл. 1. Здесь для фиксированных уровней температуры испытаний представлены значения математического ожидания a_m и среднеквадратического отклонения σ работы разрушения. Получено, что разброс значений E_V

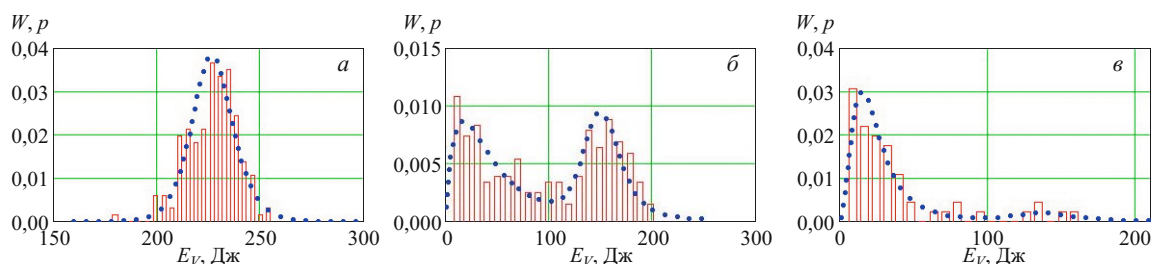


Рис. 4. Гистограммы относительных частот W и расчетные кривые плотности вероятностей p (точки) для температур +20 (а), -65 (б) и -85 °C (в)

Таблица 1. Результаты статистической обработки испытаний ударных образцов

№ п/п	Параметр	Температура испытаний T , °C								
		20	-25	-35	-45	-55	-65	-75	-85	-95
1	Число образцов	168	48	130	173	188	206	143	58	6
2	a_m , Дж	226,8	210	200	179	143	97,7	66	37,2	17,4
3	σ , Дж	12,2	39,6	38,1	35,6	55,4	61,6	50,8	38,2	8,7
4	γ	1	0,95	0,95	0,95	0,8	0,41	0,22	0,1	0
5	a_1 , Дж	227	221	209	182	173	152	150	140	—
6	s_1	35	20	15	14	15	13,2	9,7	10	—
7	a_2 , Дж	—	53	53	55	40	42	34	22	17,4
8	s_2	—	25	10	9	3	1,7	2,2	2,5	8,6

Таблица 2. Критериальные значения энергии разрушения

Предел текучести при температуре 20 °C, МПа	Работа разрушения, Дж	
	E_1	$E_2 = 1,5E_1$
≤ 304	23	35
304 – 402	31	47
402 – 549	39	59
549 – 687	47	71

максимален при температуре -65 °C ($\sigma = 61,6$ Дж) и минимален на уровне температур у нижнего и верхнего шельфов ($\sigma = 8,7 - 12,2$ Дж).

В табл. 1 приведены также параметры уравнения бимодального распределения (3), установленные методом наименьших квадратов. Распределения плотности вероятности p для температур испытаний 20, -65 и -85 °C, полученные дифференцированием (3), показаны на рис. 4 точками.

При определении критической температуры хрупкости в соответствии с методикой [1] используют значения работы разрушения образцов E_V , которую представляют в виде функции гиперболического тангенса:

$$E_V(T) = A + B \operatorname{th} \frac{T - T_0}{C}, \quad (4)$$

где T — температура испытаний; A , B , C и T_0 — параметры, определяемые методом наименьших квадратов.

Параметры A и B связаны с уровнями верхней H_V и нижней H_n полки сериальных температурных кривых следующими соотношениями:

$$A = (H_V + H_n)/2; \quad B = (H_V - H_n)/2.$$

Уровень верхней полки принимают равным среднему арифметическому значению работы разрушения в области соответствующих температур, а уровень нижней полки для консервативности — равным 2,7 Дж. Для испытаний рекомендуется использовать 10 – 20 образцов на всю кривую — по одному на температуру при ее распределении с равномерным шагом.

Критическую температуру хрупкости определяют [1] как максимальное из двух значений — $T_k(E_1)$ и $T_k(E_2) - 30$ °C, где $E_2 = 1,5E_1$. Критериальные значения

энергии разрушения E_1 и E_2 зависят от предела текучести материала (табл. 2).

Согласно методике [2] T_k — это минимальная температура испытаний (их рекомендовано проводить с шагом 10 °C, т.е. при $T_k - 10$, T_k , $T_k + 10$, $T_k + 20$, $T_k + 30$, $T_k + 40$), при которой выполняются следующие условия:

$$\bar{E}(T_k) \geq E_1, \quad (5)$$

$$E_{\min}(T_k) \geq 0,7E_1, \quad (6)$$

$$\bar{E}(T_k + 30) \geq E_2, \quad (7)$$

$$E_{\min}(T_k + 30) \geq 0,7E_2, \quad (8)$$

$$S_{\min}(T_k + 30) \geq 50 \%. \quad (9)$$

Условия (5) и (6) устанавливают требования соответственно к среднему \bar{E} и минимальному E_{\min} значениям энергии разрушения при $T = T_k$, условия (7) – (9) — к среднему и минимальному значениям энергии разрушения и минимальному значению доли вязкой составляющей S_{\min} в изломе ударных образцов при $T = T_k + 30$.

Если одно из условий (5) – (9) не выполняется, допускается испытать три дополнительных образца при температурах T_k и (или) $T_k + 30$. После этого проверяют выполнение условий (5) – (9) без учета результатов испытаний образца, на котором получены неудовлетворительные результаты.

В качестве недостатка методики ПНАЭ Г-7-002–86 следует отметить, что описанная процедура определения T_k не является однозначной. На усмотрение исследователя допускается переиспытание образцов, изменение шага по температуре — варьирование температур испытания с шагом 10 °C носит рекомендательный характер.

Зависимость доли вязкой составляющей в изломе от температуры для всех испытанных ударных образцов представлена на рис. 5. Аппроксимирующая кри-

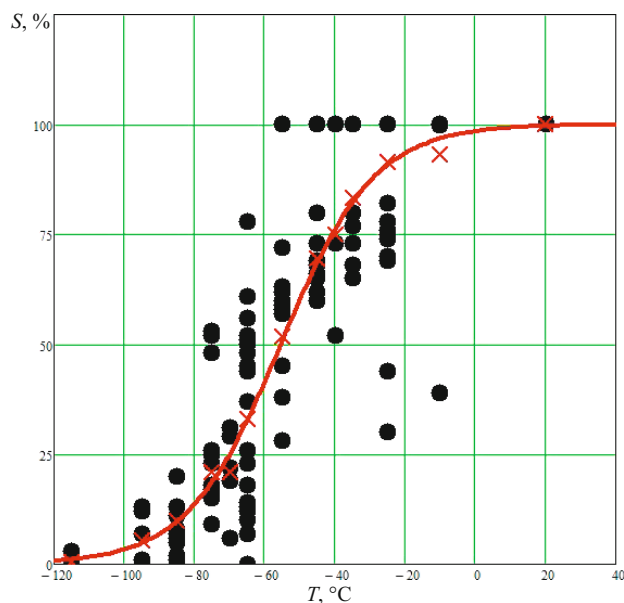


Рис. 5. Зависимость доли вязкой составляющей в изломе от температуры

вая построена с использованием метода наименьших квадратов и выражается в виде

$$S = 50 + 50 \operatorname{th} \frac{T + 55,4}{26,6}.$$

Зависимость доли вязкой составляющей в изломе S от энергии разрушения для различных температур испытаний показана на рис. 6. Видно, что между значениями E_V и S существует корреляционная зависимость (коэффициент корреляции составляет 0,945). Она означает, что для определения T_k достаточно использования одного из этих параметров. В этом смысле методика [1] предпочтительна, поскольку значения энергии разрушения E_V фиксируются непосредственно по углу отклонения маятника копра и анализ изломов образцов не требуется.

Связь между величинами S и E_V можно приближенно представить в виде степенной зависимости

$$S = 0,05 E_V^{1,395}, \quad (10)$$

параметры которой определены с использованием метода наименьших квадратов.

При статистическом моделировании процедуры определения T_k по РД ЭО 0598–2004, выполненном с использованием метода Монте-Карло [9] на основе генерации случайных значений работы разрушения и аппроксимации сериальных кривых зависимостью (4), были получены расчетные распределения критической температуры хрупкости стали 15Х2НМФАА [4].

Согласно методике ПНАЭ Г-7-002–86 помимо генерации значений энергии разрушения вычисляли значения вязкой составляющей по соотношению (10), в котором была учтена неопределенность связи $S - E_V$,

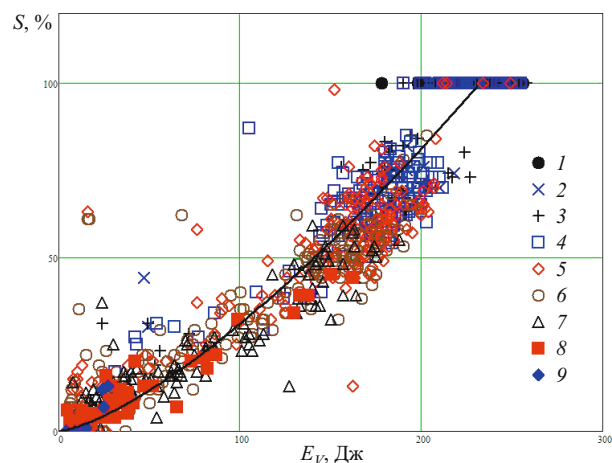


Рис. 6. Зависимость доли вязкой составляющей в изломе от энергии разрушения для температур T , равных 20 (1), –25 (2), –35 (3), –45 (4), –53 (5), –65 (6), –75 (7), –85 (8), –95 °С (9)

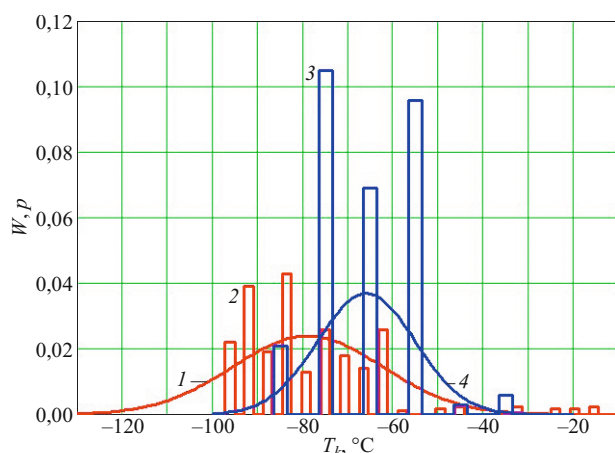


Рис. 7. Гистограммы относительных частот расчетных значений критической температуры хрупкости по методикам РД ЭО 0598–2004 (1) и ПНАЭ Г-7-002–86 (3) и плотности вероятностей нормальных распределений, соответствующие расчету по РД ЭО 0598–2004 (2) и ПНАЭ Г-7-002–86 (4)

обусловленная случайным разбросом экспериментальных данных в виде

$$S = 0,05 E_V^{1,395} + \delta(E_V), \quad (11)$$

где δ — распределенная по нормальному закону случайная величина, среднеквадратическое отклонение которой определяли с учетом зависимости рассеяния от величины E_V .

Для набора статистики процедуру определения T_k по каждой из методик повторяли 100 раз.

Результаты моделирования T_k по методике РД ЭО 0598–2004 (по одному образцу на 10 уровнях температуры) и ПНАЭ Г-7-002–86 (по три образца через 10 °С) в диапазоне от –95 до +15 °С представлены в виде гистограмм относительных частот значений критической температуры хрупкости (рис. 7).

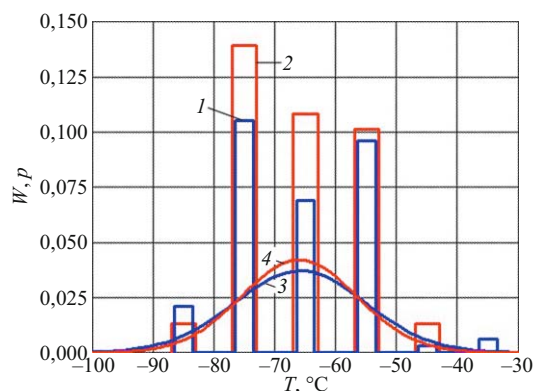


Рис. 8. Гистограммы относительных частот расчетных значений критической температуры хрупкости по методике ПНАЭ Г-7-002–86 (1 — расчет; 2 — эксперимент) и плотности вероятностей нормальных распределений, соответствующие расчету по ПНАЭ Г-7-002–86 (3) и экспериментальным данным (4)

Величины T_k , установленные по ПНАЭ Г-7-002–86, имеют дискретные значения с шагом $10\text{ }^\circ\text{C}$ в соответствии с заданным при испытании уровнем температур. С вероятностью 90 % температуры T_k попадают в интервал $-55 \div -85\text{ }^\circ\text{C}$. Среднее значение $T_k = 65,9\text{ }^\circ\text{C}$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 10,8\text{ }^\circ\text{C}$. Примерно такой же интервал значений T_k и аналогичный характер распределения были получены при обработке представленного выше массива экспериментальных данных (59 значений T_k) по методике ПНАЭ Г-7-002–86 (рис. 8). С вероятностью 90 % температуры T_k находятся в пределах от -55 до $-75\text{ }^\circ\text{C}$, среднее значение $T_k = 66\text{ }^\circ\text{C}$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 9,5\text{ }^\circ\text{C}$.

При испытании по методике РД ЭО 0598–2004 получено асимметричное распределение с вытянутым участком в области повышенных значений критической температуры хрупкости. Это согласуется с приведенными на рис. 2 экспериментальными данными, из которых видно, что на уровне значения энергии разрушения $E_V = 39\text{ Дж/см}^2$ (по которому в большинстве случаев определялась T_k) область разброса данных справа от кривой гиперболического тангенса более

протяженная, чем слева. По этой методике получено среднее значение $T_k = -78\text{ }^\circ\text{C}$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 16,1\text{ }^\circ\text{C}$.

Из рис. 7 видно, что гистограммы распределений T_k , рассчитанных по методикам ПНАЭ Г-7-002–86 и РД ЭО 0598–2004, пересекаются, причем среднее значение T_k , полученное по ПНАЭ Г-7-002–86, превышает соответствующее T_k , установленное по РД ЭО 0598–2004, примерно на $12\text{ }^\circ\text{C}$.

Для более детального анализа методики РД ЭО 0598–2004 были смоделированы три схемы испытаний: по одному образцу на каждом уровне температуры при варьируемом числе уровней от 5 до 50; на 10 фиксированных уровнях температуры и варьировании числа образцов, испытываемых на каждом уровне от 1 до 100; на двух фиксированных уровнях (-50 и $-80\text{ }^\circ\text{C}$) при числе образцов на каждом уровне от 3 до 25. Последний вариант выбран в связи с тем, что переходная область кривой гиперболического тангенса приближенно описывается прямой линией, для определения которой достаточно двух точек. Уровни температуры могут быть установлены по данным предварительных испытаний. Для оценки разброса значений T_k численный эксперимент для всех схем испытаний также повторяли 100 раз.

Из табл. 3 видно, что средние значения критической температуры хрупкости T_k во всех численных экспериментах находятся в пределах $-77 \div -88\text{ }^\circ\text{C}$, что близко к экспериментально установленному для всего массива данных значению $T_k = -84\text{ }^\circ\text{C}$. Последняя величина практически совпадает с расчетной $T_k = -85\text{ }^\circ\text{C}$, соответствующей испытаниям 100 образцов на 10 уровнях температуры, обеспечивающим максимальную точность оценки $T_k (\pm 2\text{ }^\circ\text{C})$.

Изменение схемы испытаний приводит к существенным отличиям среднеквадратических отклонений. При одинаковом общем количестве образцов максимальное рассеяние получено при испытании одного образца на каждом уровне температуры (испытания № 1–4), минимальное — при испытании на двух уровнях температуры. При увеличении количества ис-

Таблица 3. Расчетные значения критической температуры хрупкости T_k

Номер испытания	n_1 (количество образцов на одном уровне температуры)	n_2 (количество уровней температуры)	$T_k, \text{ }^\circ\text{C}$ (среднее)	$\sigma, \text{ }^\circ\text{C}$	$T_k^{\min}, \text{ }^\circ\text{C}$ (90 %)	$T_k^{\max}, \text{ }^\circ\text{C}$ (90 %)	$\delta T, \text{ }^\circ\text{C}$ (90 %)
1	1	5	-77	17	-93	-44	49
2	1	10	-78	16,1	-96	-54	42
3	1	20	-77	15,9	-95	-54	41
4	1	50	-79	11,8	-96	-62	34
5	2	10	-82	8,74	-93	-71	22
6	3	10	-84	7,4	-94	-74	20
7	10	10	-86	3,9	-91	-81	10
8	100	10	-85	1,44	-87	-83	4
9	3	2	-86	12,1	-104	-70	34
10	5	2	-88	11,1	-100	-72	28
11	10	2	-88	6,8	-97	-79	18
12	25	2	-87	4,1	-92	-82	10

пытанных образцов на каждом уровне величина σ закономерно снижается для всех рассмотренных схем испытания.

Эффективность схемы испытания нескольких образцов на каждом из двух уровней объясняется тем, что кривая гиперболического тангенса при этом строится с использованием метода наименьших квадратов (МНК) по осредненным для каждой температуры достаточно устойчивым значениям E_V .

При испытании по одному образцу на различных уровнях температуры кривая по МНК строится по одиночным случайным значениям E_V и имеется вероятность того, что большинство экспериментальных точек ляжет у верхней или нижней моды, что, естественно, приведет к значительному рассеянию значений T_k . В качестве плюса схемы испытания по одному образцу на температуру можно отметить ее консервативность — несимметричное распределение плотности вероятности имеет вытянутую правую часть, что приводит к завышению значений T_k .

С использованием полученных при рассмотренных схемах испытаний характеристик распределения выполнена оценка границ интервалов $T_k^{\min} - T_k^{\max}$, в которые с 90 %-ной вероятностью попадают значения критической температуры хрупкости (см. табл. 3).

Учитывая, что реальное число образцов, используемых при оценке T_k , обычно не превышает 20 шт., даже при схеме испытаний по 10 образцов на двух уровнях температуры отклонения T_k могут быть примерно ± 10 °С (с вероятностью 90 %). При испытании по одному образцу на 20 уровнях температуры отклонения T_k в сторону увеличения составляют до +31 и в сторону снижения — до -10 °С, т.е. теоретически можно получить отличие в T_k более 40 °С. Однако в этом интервале в силу асимметричного характера распределения плотности вероятности основной массив (свыше 95 %) значений T_k попадает в более узкий диапазон — от -60 до -95 °С.

Зависимость ширины 90 %-го интервала T_k от общего числа испытанных образцов показана на рис. 9. Видно, что для более точной оценки T_k требуется значительное увеличение количества образцов. Например для определения T_k с погрешностью ± 5 °С при испытании на двух уровнях необходимо не менее 50 образцов, а на 10 уровнях — не менее ста.

При разработке РД ЭО 0598–2004 и ПНАЭ Г-7-002–86 в полной мере не были учтены закономерности рассеяния значений ударной вязкости и вязкой составляющей в изломе ударных образцов. В силу этого отсутствовали достаточно статистически обоснованные оценки погрешностей определения T_k . Представленные здесь данные показывают, например, что разброс значений при определении T_k на однородном металле по методике РД ЭО 0598–2004 может существенно превышать 1–2 °С, указанные в [12].

В работе [12] процедура обоснования погрешностей определения T_k заключалась в том, что сначала

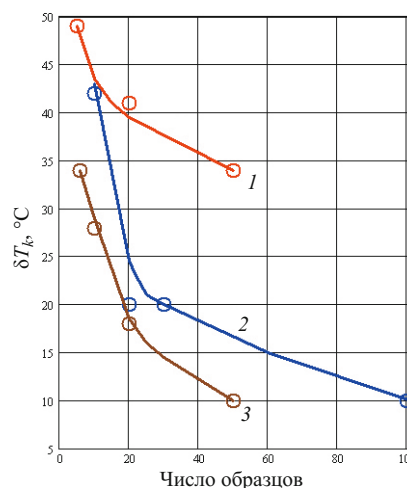


Рис. 9. Зависимость ширины 90 %-го интервала δT_k от общего числа испытанных образцов: 1 — по одному образцу на температуру; 2 — на 10 уровнях температуры; 3 — на двух уровнях температуры

величину T_k получали на выборке из шести значений энергии разрушения. Затем к этой выборке добавляли по одному образцу и после каждого добавления определяли новое значение T_k . При суммарном объеме выборки из 15 значений E_V дальнейшее увеличение числа образцов (до 25) приводило к изменению T_k на 1–2 °С.

Такая процедура оценки рассеяния T_k не корректна, поскольку каждая серия значений энергии разрушения для определения T_k должна быть получена из независимых испытаний. Кроме того, сам подход к оценке однородности металла корпуса реактора по косвенно определяемым значениям T_k методически не обоснован, для оценки однородности металла следует использовать прямые экспериментальные данные по энергии разрушения.

Следует также отметить, что установленный в [12] разброс значений T_k по объему обечайки КР (исключая пробное верхнее кольцо) составляет примерно 25 °С и объясняется авторами указанной работы неоднородностью металла. Однако данные отклонения находятся, как показано выше, в пределах погрешности оценки T_k по методике РД ЭО 0598–2004 при испытании по одному образцу на 10–15 уровнях температуры.

Подводя итоги, можно сделать следующие выводы.

1. Статистические методы анализа рассеяния значений энергии разрушения ударных образцов, вырезанных из различных зон обечайки КР, показали, что при соблюдении технологии изготовления обеспечивается получение однородного по свойствам металла (с надежностью не ниже 95 %).

2. Выводы о неоднородности металла обечаек КР на основании единичных (для каждой зоны) значений T_k , установленных по методике РД ЭО 0598–2004 [10–12], нельзя рассматривать как корректные,

так как величина T_k характеризуется значительным разбросом.

3. При расчетах на хрупкую прочность введение запаса по критической температуре хрупкости на неоднородность основного металла КР [13] является неоправданным и излишне консервативным. Необходимо запас, учитывающий рассеяние значений T_k , определяемых по данным испытаний ограниченного числа ударных образцов. При использовании методики РД ЭО 0598–2004 этот запас с учетом смещенных оценок T_k можно принять равным 10 °С.

4. Средние значения T_k , определяемые по методикам ПНАЭ Г-7-002–86 и РД ЭО 0598–2004, отличаются. Если исходная критическая температура хрупкости T_{k0} находится по методике ПНАЭ Г-7-002–86, а T_k — по РД ЭО 0598–2004, то это отличие будет приводить к дополнительным погрешностям при оценке сдвигов T_k от радиационного и термического охрупчивания. Для определения T_k целесообразно использовать единую методику как на стадии заводских испытаний, так и при эксплуатации и моделировании охрупчивания. В качестве такой методики целесообразно использовать документ РД ЭО 0598–2004, в котором для повышения достоверности значений T_k следует принять более рациональную схему испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- 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.
- ПНАЭ Г-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергоустановок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
- Степнов М. Н. Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств. — Новосибирск: Наука, 2005. — 342 с.
- Казанцев А. Г., Маркочев В. М., Сугирбеков Б. А. Оценка погрешностей определения критической температуры хрупкости металла корпуса реактора ВВЭР-1000 с использованием метода Монте-Карло / Тяжелое машиностроение. 2015. № 10. С. 19 – 27.
- Давиденков Н. Н. Динамические испытания металлов. — М.: ОНТИ НКТП СССР, 1936. — 395 с.
- Шевандин Е. И., Разов И. А. Хладноломкость и предельная пластичность металлов в судостроении. — Л.: Судостроение, 1965. — 336 с.
- Кантор М. М., Боженков В. А. Рассеяние значений ударной вязкости низколегированной стали в критическом интервале хладноломкости / Материаловедение. 2013. № 11. С. 3 – 14.
- Маркочев В. М., Александрова О. В. Дробно-степенная функция для описания распределения вероятностей / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 11. С. 71 – 73.
- Бусленко Н. П., Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация в цифровых машинах. — М.: Физматлит, 1961. — 228 с.
- Chernobaeva A. A., Nikolaev Yu. A., Skundin M. A., Zhurko D. A., Krasikov E. A., Medvedev K. I., Kostromin V. N., Drobkov G. V., Ryasanov S. V. Data scatter cause analysis of the temperature surveillance specimens of VVER-1000 metal / J. Atom. Energy. 2012. Vol. 113. Issue 6. P. 337 – 344.
- Chernobaeva A. A., Kuleshova E. A., Skundin M. A., Maltsev D. A., Chirko L. I., Revka V. N. Revision of date base of VVER-1000 thermal aging surveillance specimens / Proceeding of SMIRT 22, USA, San-Francisco, 2013. P. 138 – 147.
- Chernobaeva A. A. Obosnovanie modelei radiatsionnogo okhrupchivaniya materialov korpusov reaktorov i protsedury ikh primeneniya dlya otsenki sostoyaniya ekspluatiruyushchikhsya korpusov reaktorov: diss. ... dokt. tekhn. nauk [Justification of radiation embrittlement models of RPV materials and procedures of their application for the assessment of operated reactor pressure vessels. Author's abstract of doctoral thesis]. — Moscow, 2009. — 228 p. [in Russian].
- RD ÉO 1.1.2.0.0789–2012. Metodika opredeleniya vyzkosti razrusheniya po rezul'tatam ispytaniy obrazcov-svidetelei dlya rascheta prochnosti i resursa korpusov reaktorov VVER-1000 [Methods of determining the viscosity as a result of destruction test witnesses samples to calculate the strength and service life of reactor vessels VVER-1000]. — Moscow: Rosénergoatom, 2012. — 56 p. [in Russian].
- Chernobaeva A. A. Obosnovanie modelei radiatsionnogo okhrupchivaniya materialov korpusov reaktorov i protsedury ikh primeneniya dlya otsenki sostoyaniya ekspluatiruyushchikhsya korpusov reaktorov: diss. ... dokt. tekhn. nauk. — M., 2009. — 228 s.
- РД ЭО 1.1.2.0.0789–2012. Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000. — М.: Росэнергоатом. — 56 с.

REFERENCES

- RD ÉO 0598–2004 Metodika opredeleniya kriticheskoi temperatury khrupkosti materialov korpusov reaktorov po rezul'tatam ispytaniy malorazmernykh obraztsov na udarniy izgib [Methods of determining the critical temperature brittleness of RPV materials using results of small size specimens impact test]. — Moscow: Rosénergoatom, 2004. — 12 p. [in Russian].
- PNAÉ G-7-002–86. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh énergoustanovok [The rules on the evaluation of the strength of the equipment and pipelines of nuclear power plants]. — Moscow: Énergoatomizdat, 1989. — 525 p. [in Russian].
- Stepnov M. N. Veroyatnostnye metody otsenki kharakteristik mekhanicheskikh svoystv [Probabilistic methods of evaluating the characteristics of the mechanical properties]. — Novosibirsk: Nauka, 2005. — 342 p. [in Russian].
- Kazantsev A. G., Markochev V. M., Sugirbekov B. A. Otsenka pogreshnostei opredeleniya kriticheskoi temperatury khrupkosti metalla korpusa reaktora VVER-1000 s ispol'zovaniem metoda Monte-Karlo [Estimation of errors in determining the critical metal transition temperature of the reactor VVER-1000 using the Monte Carlo method] / Tyazh. Mashinostr. 2015. N 10. P. 19 – 27 [in Russian].
- Davidenkov N. N. Dinamicheskie ispytaniya metallov [Dynamic testing of metals]. — Moscow: Izd. ONTI NKTP SSSR, 1936. — 395 p. [in Russian].
- Shevandin E. I., Razov I. A. Khladnolomkost' i predel'naya plastichnost' metallov v sudostroenii [Cold brittleness and ductility of metals in shipbuilding]. — Leningrad: Sudostroenie, 1965. — 336 p. [in Russian].
- Kantor M. M., Bozhenov V. A. Rasseyanie znachenii udarnoi vyzkosti nizkolegirovannoi stali v kriticheskom intervale khladnolomkosti [Scattering of the toughness values of low alloy steel in the critical range of cold brittleness] / Materialovedenie. 2013. N 11. P. 3 – 14 [in Russian].
- Markochev V. M., Aleksandrova O. V. Drobno-stepennaya funktsiya dlya opisaniya raspredeleniya veroyatnostei [Fractional power function in description of the probability] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 11. P. 71 – 73 [in Russian].
- Buslenko N. P., Shreider Yu. A. Metod statisticheskikh ispytaniy (Monte-Karlo) i ego realizatsiya v tsifrovyykh mashinakh [Method of statistical tests (Monte Carlo) and its implementation in digital machines]. — Moscow: Fizmatlit, 1961. — 228 p. [in Russian].
- Chernobaeva A. A., Nikolaev Yu. A., Skundin M. A., Zhurko D. A., Krasikov E. A., Medvedev K. I., Kostromin V. N., Drobkov G. V., Ryasanov S. V. Data scatter cause analysis of the temperature surveillance specimens of VVER-1000 metal / J. Atom. Energy. 2012. Vol. 113. Issue 6. P. 337 – 344.
- Chernobaeva A. A., Kuleshova E. A., Skundin M. A., Maltsev D. A., Chirko L. I., Revka V. N. Revision of date base of VVER-1000 thermal aging surveillance specimens / Proceeding of SMIRT 22, USA, San-Francisco, 2013. P. 138 – 147.
- Chernobaeva A. A. Obosnovanie modelei radiatsionnogo okhrupchivaniya materialov korpusov reaktorov i protsedury ikh primeneniya dlya otsenki sostoyaniya ekspluatiruyushchikhsya korpusov reaktorov: diss. ... dokt. tekhn. nauk [Justification of radiation embrittlement models of RPV materials and procedures of their application for the assessment of operated reactor pressure vessels. Author's abstract of doctoral thesis]. — Moscow, 2009. — 228 p. [in Russian].
- RD ÉO 1.1.2.0.0789–2012. Metodika opredeleniya vyzkosti razrusheniya po rezul'tatam ispytaniy obraztsov-svidetelei dlya rascheta prochnosti i resursa korpusov reaktorov VVER-1000 [Methods of determining the viscosity as a result of destruction test witnesses samples to calculate the strength and service life of reactor vessels VVER-1000]. — Moscow: Rosénergoatom, 2012. — 56 p. [in Russian].