

Оценка возможности прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения для материалов корпуса реактора ВВЭР-1000 на основе вероятностных аспектов

© А.А. Силаев¹, Н.А. Силаева², А.Ю. Логинова², А.К. Горбунов²

¹ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, 155599, Россия

² КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Показана возможность применения концепции мастер-кривой для прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения на основе испытаний маломасштабных образцов для материала применяемого при изготовлении корпуса ВВЭР-1000.

Ключевые слова: мастер-кривая, базовая кривая, вязкость разрушения, вероятность разрушения, компактный образец.

В настоящее время существует несколько подходов для прогнозирования температурных зависимостей вязкости разрушения. Согласно одному из них (в настоящее время [1] этот подход является нормативным), кривую $K_{Ic}(T)$ для облученного материала получают, используя концепцию горизонтального сдвига, а сдвиг критической температуры хрупкости определяют по сдвигу температурных зависимостей ударной вязкости. Другой подход, известный как концепция мастер-кривой [2, 3], основан на определении значений трещиностойкости путем испытания на вязкость разрушения маломасштабных образцов, на пересчете полученных значений на стандартные образцы толщиной $B = 25$ мм и на концепции горизонтального сдвига. В настоящее время разработан стандарт ASTM E 1921–97 [4], основанный на концепции мастер-кривой. Согласно данной концепции, был разработан подход, получивший название «базовая кривая». Эта зависимость отличается от мастер-кривой тем, что она определена для вероятности хрупкого разрушения $P_f = 0,05$, толщины образца $B = 150$ мм, а в качестве приведенной температуры используется разность $T - T_k$, где T — температура испытаний; T_k — критическая температура хрупкости материала.

Для прогнозирования трещиностойкости облученных сталей используют также подходы, основанные на локальных критериях разрушения [5–7].

В настоящей работе рассмотрена возможность применения мастер-кривой к материалам корпуса реактора ВВЭР-1000 из стали 15X2НМФАА и сварного шва стали 15X2НМФА. Для описания

разброса данных по K_{1c} (или K_{Jc}) в области хрупкого разрушения использованы статистические модели, базирующиеся на теории наислабейшего звена Вейбулла [8]. В работах [9–11] показано, что разброс данных по K_{1c} описывается с помощью трехпараметрической функции распределения Вейбулла

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

где P_f — вероятность того, что вязкость разрушения материала будет не больше, чем K_{1c} ; K_0 — параметр масштаба, зависящий от температуры и толщины образца; K_{\min} — минимальная вязкость разрушения; $b = 4$ независимо от типа материала, температуры испытаний и толщины образцов.

Влияние толщины образца на вязкость разрушения характеризуется зависимостью

$$\frac{K_{1c}^x - K_{\min}}{K_{1c}^y - K_{\min}} = \left(\frac{B_y}{B_x} \right)^{1/4}, \quad (2)$$

где K_{1c}^x , K_{1c}^y — вязкости разрушения образцов толщиной B_x и B_y , соответствующие одной и той же вероятности P_f .

Концепция мастер-кривой основывается на следующих положениях:

разброс данных по статической трещиностойкости описывается зависимостью (1);

влияние толщины образца на вязкость разрушения выражается соотношением (2);

температурная зависимость среднего значения ($P_f = 0,5$) вязкости разрушения $K_{1c\text{cp}}$ для образцов толщиной $B = 25$ мм описывается уравнением

$$K_{1c\text{cp}}(T) = 30 + 70 \exp[0,019(T - T_0)], \quad (3)$$

где T_0 — температура, при которой при $B = 25$ мм $K_{1c\text{cp}} = 100$ МПа · м^{1/2} (зависимость (3) называют мастер-кривой);

в процессе охрупчивания материала изменяется только параметр T_0 , остальные параметры в уравнении (3) постоянны.

При обработке экспериментальных данных, полученных при испытании образцов, толщина которых отлична от $B = 25$ мм, проводят пересчет данных по формуле (2) на образец толщиной $B = 25$ мм.

Параметр масштаба K_0 , зависящий от температуры и толщины образца, при вероятности хрупкого разрушения $P_f = 0,5$ определяется на основании выражения (1) по формуле

$$K_0 = \left[\sum \frac{(K_{Jci} - K_{\min})^4}{N - 0,3086} \right]^{1/4} + K_{\min}, \quad (4)$$

где N — число испытанных образцов толщиной $B_{\text{исп}}$. Стандартом ASTM E 1921–97 установлено, что минимальное число образцов для получения зависимости $K_{1c}(T)$ равно 6; минимально возможное значение K_{1c} , $K_{\min} = 20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Вязкость K_{Jci} находят из выражения

$$K_{Jc} = \sqrt{J_c E'},$$

где J_c — интеграл Черепанова — Райса; $E' = E/(1 - \mu^2)$; E — модуль упругости; μ — коэффициент Пуассона.

Интеграл J_c определяют из диаграммы нагрузка—перемещение при испытании компактных образцов. На диаграмме выделяют упругую и пластическую составляющие работы деформации и с их помощью находят интеграл J .

Справочную температуру T_0 вычисляют по формуле, вытекающей из выражения (3):

$$T_0 = T_{\text{исп}} - \frac{1}{0,019} \ln \frac{K_{Jc\text{ср}} - 30}{70},$$

где $T_{\text{исп}}$ — температура испытаний образцов толщиной $B_{\text{исп}}$; $K_{Jc\text{ср}}$ — среднее значение вязкости разрушения для образцов СТ-1Т толщиной 25 мм,

$$K_{Jc\text{ср}} = (K_0 - 20)(\ln 2)^{1/4} + 20.$$

Для обоснования возможности применения концепции мастер-кривой к материалу корпуса реактора ВВЭР-1000 были исследованы обечайки электродуговой и мартеновской плавок из стали 15Х2НМФАА, а также сварной шов стали 15Х2НМФА с содержанием никеля не более 1,3 %. Обечайка электродуговой выплавки (поковка № 14308) была изготовлена на заводе «Энергомашспецсталь», а обечайка мартеновской выплавки (поковка № 448530) — на ПО «Ижорский завод». Там же была выполнена сварная проба размером 300×250×1500 мм. Сварной шов был получен по штатной технологии с содержанием никеля не более 1,3 % проволокой Св-12Х2Н2ММАА под флюсом ФЦ-16А.

Обечайки, имеющие высоту 2 160 мм и наружный диаметр 4 535 мм, были разрезаны на кольца и темплеты. Из последних были изготовлены образцы растяжения, ударные образцы Шарпи и компактные образцы СТ-1/2Т, СТ-1Т, СТ-2Т и СТ-3Т. Для обечайки электродуговой плавки оси образцов растяжения располагали в направлении толщины кольца, а надрезы на ударных и компактных образцах СТ-1/2Т, СТ-1Т, СТ-2Т и СТ-3Т создавали в кольцевом направлении обечайки. Для обечайки мартеновской плавки оси образцов растяжения располагали в кольцевом направлении, а надрезы и усталостные трещины на компактных образцах СТ-1/2Т, СТ-1Т и СТ-2Т создавали в направлении толщины кольца. Из сварной пробы были вырезаны ударные образцы Шарпи, образцы растяжения и компактные образцы СТ-1Т и СТ-4Т.

Образцы растяжения испытывали при температурах 20 и 350 °С для определения механических свойств исследуемых материалов (представлены в таблице).

Механические свойства исследуемых материалов

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$R_{p0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$
Сварной шов стали 15Х2НМФА	20	488	589	23,5	73,7
	350	428	499	17,2	68,5
Сталь 15Х2НМФАА: мартеновской плавки электродуговой плавки	20	606	721	19,4	75,5
	350	535	644	16,4	68,4
	20	579	671	16,3	70,8
	350	493	597	15,4	67,4

При испытании образцов толщиной $V_{\text{исп}} = 12,5$ мм для обечаек и $V_{\text{исп}} = 25$ мм для сварной пробы определяли разброс полученных значений K_{Ic} и строили мастер-кривую с доверительными интервалами 5 и 95 %. Более крупные образцы испытывали в температурном диапазоне $-196...+20$ °С. На них предполагалось проверить экспериментальные данные, полученные на основании испытаний образцов толщиной $V_{\text{исп}}$ в соответствии с требованиями стандарта ASTM E 1921–97.

Результаты испытаний ударных образцов Шарпи позволили в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-7-002–86 [12] определить критическую температуру хрупкости T_{k0} исследуемых материалов. Для стали 15Х2Н МФАА электродуговой плавки она составила -65 °С, для мартеновской плавки -60 °С, для сварного шва стали 15Х2НМФА -20 °С. Также на основании этих результатов в соответствии со стандартом ASTM E1921–97 была определена температура $T_{\text{исп}}$ образцов толщиной $V_{\text{исп}}$, которая для стали 15Х2НМФАА электродуговой плавки составила -105 °С, для мартеновской плавки -125 °С, для сварного шва стали 15Х2НМФА -70 °С.

На основании результатов испытаний маломасштабных образцов толщиной $B_{исп}$ были построены мастер-кривые, а также 5 и 95%-ные границы допуска для каждого из трех материалов. Обработку полученных экспериментальных данных проводили в соответствии со стандартом ASTM E 1921–97. По результатам расчетов справочную температуру T_0 стали 15X2НМФАА электродуговой плавки получили равной $-100\text{ }^\circ\text{C}$, для мартеновской плавки $-118\text{ }^\circ\text{C}$, для сварного шва стали 15X2НМФА $-60\text{ }^\circ\text{C}$.

Мастер-кривые и границы допуска для исследуемых материалов приведены на рис. 1.

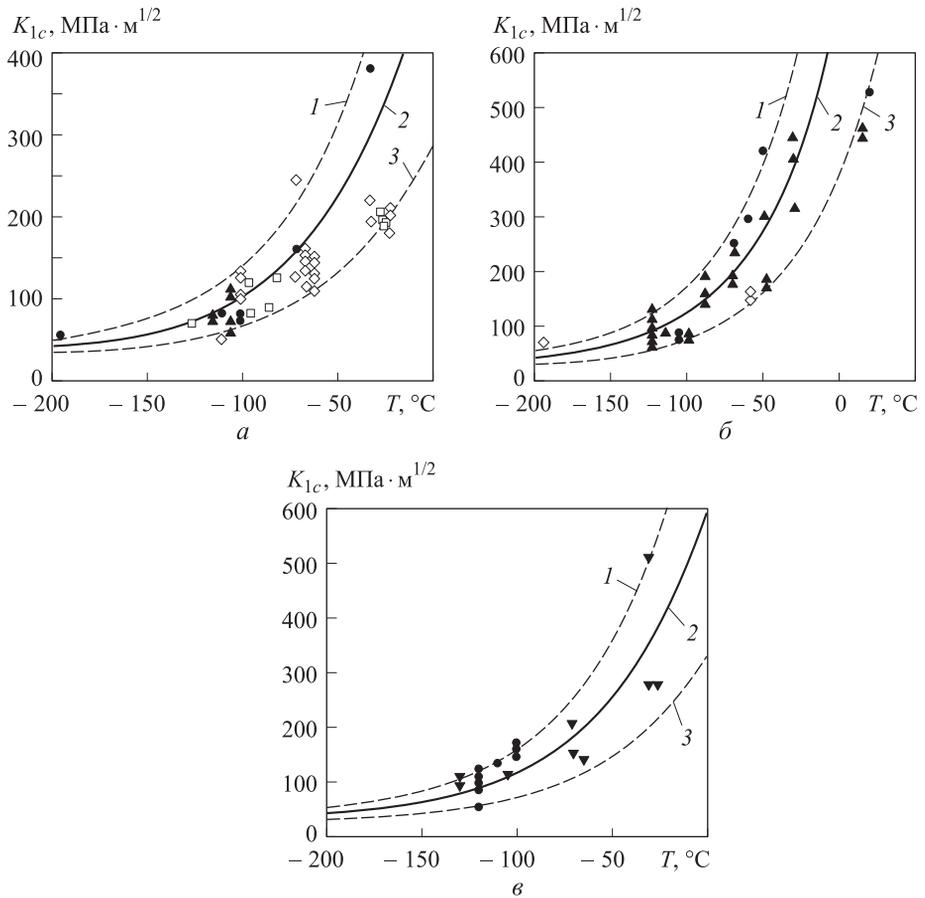


Рис. 1. Температурные зависимости вязкости разрушения для стали 15X2НМФАА электродуговой плавки (а), сварного шва 15X2НМФАА мартеновской плавки (б) и сварного шва 15X2НМФАА (в):

1, 3 — 95 и 5%-ные границы допуска соответственно; 2 — мастер-кривая; ▲ — СТ-1/2Т; ● — СТ-1Т; ◇ — СТ-2Т; □ — СТ-3Т; ▼ — СТ-4Т

Для 5 и 95%-ных границ допуска использовали выражение

$$K = D_1 + D_2 \exp[0,019(T - T_0)],$$

где D_1 и D_2 — справочные коэффициенты, определяемые стандартом ASTM E 1921–97,

$$D_1^{5\%} = 25,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}, \quad D_1^{95\%} = 36,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2};$$

$$D_2^{5\%} = 37,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}, \quad D_2^{95\%} = 102,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}.$$

Почти все экспериментальные точки расположились в поле, ограниченном 5 и 95 %-ными границами допуска. Выполненное экспериментальное исследование показывает, что концепция мастер-кривой позволяет получать достаточно достоверные данные по статической трещиностойкости для материалов корпусов реакторов типа ВВЭР-1000.

Необходимо отметить, что мастер-кривая относится к температурной зависимости вязкости разрушения для вероятности хрупкого разрушения $P_f = 0,5$ и $B = 25$ мм (СТ-1Т). Нижние огибающие, которые устанавливает ПНАЭ Г-7-002–86 [12] для реакторных сталей, получены в результате испытаний образцов самой различной толщины, вплоть до $B = 200$ мм (СТ-8Т).

До настоящего момента в России расчет оборудования и трубопроводов атомных электроустановок проводили согласно ПНАЭ 7-002–86. Все реакторы, действующие на территории России, СНГ, стран Восточной Европы и Финляндии, были спроектированы и введены в эксплуатацию с учетом документа [12]. В качестве определяющего параметра при расчете на вязкость разрушения использовали критическую температуру хрупкости материала T_k . С учетом этого параметра для материалов и их сварных соединений корпусов реакторов были установлены нормативные кривые.

Совершенно другой подход к расчету материала на вязкость разрушения предлагает нормативный подход с использованием мастер-кривой, основанный на [4]. Он предполагает обобщенную температурную зависимость для материалов и их сварных соединений корпусов реакторов. Следует обратить внимание на тот факт, что большинство исследований на основании этой концепции были проведены на материалах корпусов реакторов США и Западной Европы и лишь позже, когда вышел в свет стандарт ASTM E 1921–97, начались исследования отечественных корпусных сталей. Отметим, что корпусные стали реакторов США и Западной Европы отличает меньшее требование к прочностным и вязкостным характеристикам в сравнении с отечественными корпусными сталями. Связано это с тем, что поскольку корпус реактора от завода-изготовителя до строительной площадки атомных электростанций транспортировали железнодорожным путем, а не водным, как за рубежом, к ним предъявляли повышенные требования по прочности и вязкости.

Стандарт ASTM E 1921–97 предусматривает расчет на вязкость разрушения ферритных сталей и их сварных соединений с пределом текучести $R_{p0,2} = 275 \dots 825$ МПа. Установление обобщенной температурной зависимости приводит к тому, что сталям с высокими прочностными и вязкостными характеристиками придается излишняя консервативность, приводящая к существенному неиспользованию свойств материала. Это видно на рис. 2, где представлены экспериментальные данные по вязкости разрушения: нормативная кривая из документа [12], базовая и мастер-кривая для вероятности $P_f = 0,05$ крупного разрушения и толщины образца $B = 150$ мм.

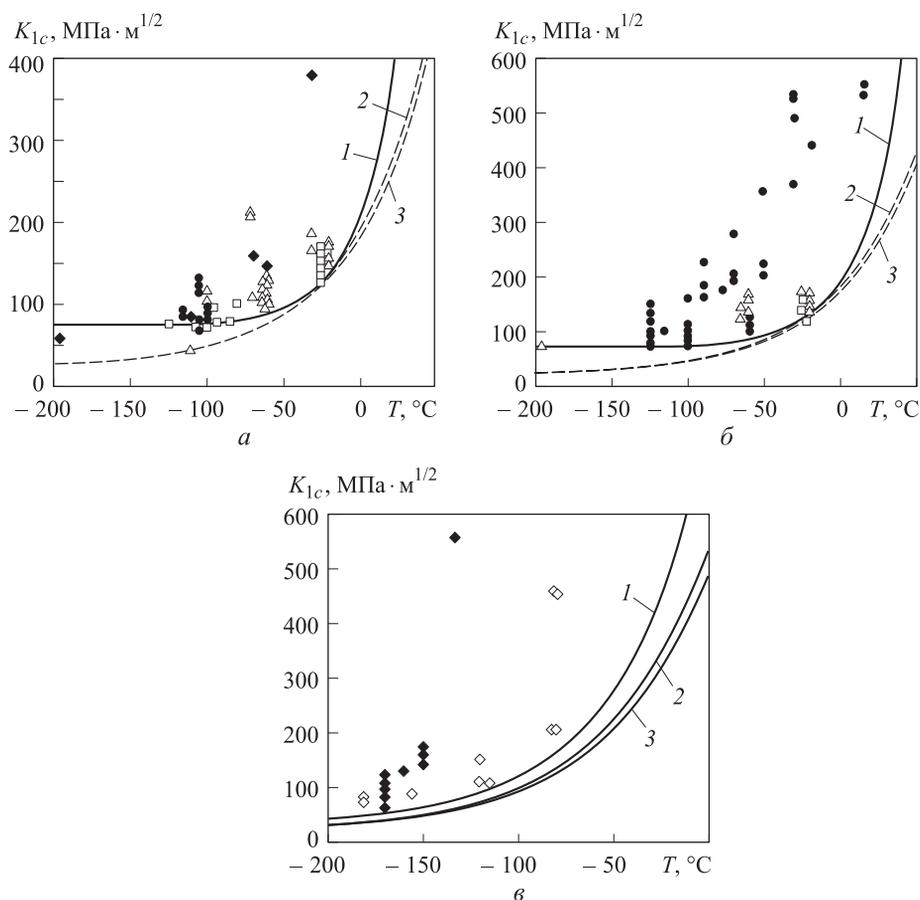


Рис. 2. Экспериментальные данные по вязкости разрушения для стали 15X2NMΦАА электродуговой плавки (а), для стали 15X2NMΦАА мартеновской плавки (б) и для сварного шва стали 15X2NMΦА с пониженным содержанием никеля (в):

1 — нормативная кривая; 2 — базовая кривая; 3 — мастер-кривая; ● — СТ-1/2Т;
 ◆ — СТ-1Т; △ — СТ-2Т; □ — СТ-3Т; ◇ — СТ-4Т

Концепция мастер-кривой предусматривает использование в качестве расчетного параметра вязкости разрушения температуру T_0 , методика определения которой существенно отличается от методики определения T_K , в связи с чем указанные температуры не совпадают.

В качестве приведенной температуры в нормативных кривых взята разность $T - T_K$, а в мастер-кривой $T - T_0$. Накопленные за последние 20–30 лет данные для материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в основном были представлены в виде зависимостей $K_{Ic}(T - T_K)$. Большинство значений K_{Ic} для корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 было определено на основе линейной механики разрушения, а значит, наиболее надежными и корректными являются данные, полученные для образцов большой толщины.

Таким образом, концепции мастер-кривой и базовой кривой, предполагающие обобщенную температурную зависимость вязкости разрушения для всех ферритно-перлитных сталей с $R_{p0,2} = 275 \dots 825$ МПа, не учитывают индивидуальных прочностных и вязкостных особенностей сталей 15X2НМФА, 15X2НМФАА, а также их сварных соединений. Поэтому использовать их можно только для предварительных оценочных расчетов на сопротивление хрупкому разрушению, а окончательный расчет необходимо проводить по данным аттестационных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*. New York, American Society of Mechanical Engineers, Section IX, 1968.
- [2] Wallin K. Recommendations for the application of fracture toughness data for structural integrity assessment: *Proc. of the AEA/CSNI specialists meeting on fracture mechanics verification by large scale testing, 3ak Ridge, 26-29 oct. 1992*, pp. 465–494.
- [3] Wallin K. The size effect in K_{Ic} results. *Eng. Fract. Mech.* 1985, no. 22, pp. 149–163.
- [4] ASTM E 1921–97. Standard Test Method for Determination of Reference temperature T_0 for Ferritic Steels in the Transition Range. *Annual Book of ASTM Standards*, 2005, no. 3, pp. 1068–1084.
- [5] Ritchie R.O., Knott J.F., Rice J.R. On the relation between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel. *J. Mech. Phys. Solids*. 1973, no. 21, pp. 395–410.
- [6] Beremin F.M. A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel. *Mel. Trans.* 1983, no. 14A, pp. 77–87.
- [7] Margolin B.Z., Gnlenko A.G., Shvetsova V.A. Probabilistic model for fracture toughness prediction based on the new local fracture criteria. *J. Pres. Ves. & Piping*. 1998, no. 75, pp. 307–320.
- [8] Weibull W. A. A statistical theory of strength of materials. *Roy. Swed. Inst. Eng. Res.* 1939, vol. 151, pp. 5–45.
- [9] Болотин В.В. *Статистические методы в строительной механике*. Москва, Стройиздат, 1961, с. 616–645.
- [10] Фрейденталь А.М. Статистический подход к хрупкому разрушению. *Разрушение*. Сб. ст. Москва, Мир, 1975, т. 2, с. 616–645.

- [11] Waliln K. The scatter in K_{Ic} result. *Eng. Fract. Mech.* 1984, no. 19, pp. 1085–1095.
- [12] ПНАЭ Г-7-002–86. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок*. Москва, Энергоатомиздат, 1989, 528 с.

Статья поступила в редакцию 03.04.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Силаев А.А., Силаева Н.А., Логинова А.Ю., Горбунов А.К. Оценка возможности прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения для материалов корпуса реактора ВВЭР-1000 на основе вероятностных аспектов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/energy/1265.html>

Силаев Алексей Альбертович родился в 1972 г., окончил КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000 г. Канд. техн. наук, заведующий лабораторией механических свойств в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ». Область научных интересов: исследование прочностных свойств материалов. e-mail: a.a.silaev@inbox.ru

Силаева Наталья Альбертовна родилась в 1968 г., окончила КГПУ им. К.Э. Циолковского в 1992 г. Ст. преп. кафедры «Физика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: исследование прочностных свойств материалов. e-mail: silaeva1968@list.ru

Логинова Алла Юрьевна родилась в 1959 г., окончила МФ МХТИ им. Д.И. Менделеева в 1981 г. Канд. хим. наук, доцент кафедры «Промышленная экология и химия» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физическая и неорганическая химия. e-mail: kf_mgtu_fiz@mail.ru

Горбунов Александр Константинович родился в 1947 г., окончил МФТИ в 1971 г. Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физика конденсированного состояния. e-mail: kf_mgtu_fiz@mail.ru

Assessing the possibility of predicting the temperature dependence of fracture toughness for materials of VVER-1000, based on the probabilistic aspects

© A.A. Silaev¹, N.A. Silaeva², A.Yu. Loginova², A.K. Gorbunov²

¹ Public corporation Scientific and Production Association “Central Research Institute of Machine Building Technology”, Moscow, 155599, Russia

² Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, 248000, Russia

The article examines the possibility of applying the concept of the master curve for predicting the temperature dependence of fracture toughness on the basis of small-scale test samples for the material used in the manufacture of VVER-1000.

Keywords: master curve, base curve, fracture toughness, fracture probability, compact sample.

REFERENCES

- [1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code. New York, American Society of Mechanical Engineers, Section IX, 1968.
- [2] Wallin K. Recommendations for the application of fracture toughness data for structural integrity assessment: *Proc. of the AEA/CSNI specialists meeting on fracture mechanics verification by large scale testing*, 3ak Ridge, 26–29 Oct. 1992, pp. 465–494.
- [3] Wallin K. *Eng. Fract. Mech.*, 1985, no. 22, pp. 149–163
- [4] ASTM E 1921-97. Standard Test Method for Determination of Reference temperature T for ferritic steels in the transition range. *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 03.01, vol. 1068–1084.
- [5] Ritchie R.O., Knott J.F., Rice J.R. *J. Mech. Phys. Solids*, 1973, no. 21, pp. 395–410.
- [6] Beremin F. M. *Mel. Trans.*, 1983, no. 14A, pp. 77–87.
- [7] Margolin B.Z., Gnlenko A.G., Shvetsova V.A. *J. Pres. Ves. & Piping*, 1998, no. 75, pp. 307–320.
- [8] Weibull W.A. *Roy. Swed. Inst. Eng. Res.*, 1939, vol. 151, pp. 5–45.
- [9] Bolotin V.V. Statisticheskie metody v stroitel'noi mekhanike [Statistical methods in structural mechanics]. Moscow, Stroizdat Publ., 1961, p. 202.
- [10] Freidental' A.M. Statisticheskiy podkhod k khrupkomu razrusheniyu [A statistical approach to brittle fracture]. *Razrushenie, sbornik statey* [Destruction. Coll. articles]. Moscow, Mir Publ., 1975, vol. 2, pp. 616–645.
- [11] Wallin K. The scatter in K_{Ic} result. *Eng. Fract. Mech.*, 1984, vol. 19, pp. 1085–1095.
- [12] PNAEG-7-002–86. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [RRNI G-7-002–86. Calculation norms based on the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 528 p.

Silaev A.A. (b. 1972) graduated from Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University in 2000. Ph.D., the Head of Mechanical Properties Laboratory. Author of several articles on the study of the materials strength. e-mail: a.a.silaev@inbox.ru

Silaeva N.A. (b.1968) graduated from Kaluga Pedagogical Institute named after K.E. Tsiolkovsky. The senior lecturer of the Physics Department in Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Author of several articles on strength characteristics of the material properties. e-mail: silseva1968@list.ru

Loginova A.Yu. (b. 1959) graduated from Mendeleev Institute of Chemical Technology of Russia in 1981. Ph.D., Assoc. Professor of the Industrial Ecology and Chemistry Department in Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Author of 60 research papers in the field of physical and inorganic chemistry. e-mail: kf_mgtu_fiz@mail.ru

Gorbunov A.K. (b. 1947) graduated from Moscow Institute of Physics and Technology in 1971. Dr. Sci. (Phys.&Math.), Professor, the Head of the Physics Department in Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Author of several articles on condensed matter physics. e-mail: kf_mgtu_fiz@mail.ru