

Определение температурной зависимости вязкости разрушения на основе концепций мастер-кривой и базовой кривой

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

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

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

Рассмотрены методики определения температурной зависимости вязкости разрушения с заранее заданной границей достоверности. Показана возможность их применения для материалов, используемых при производстве корпусов атомных реакторов.

Ключевые слова: мастер-кривая, базовая кривая, вязкость разрушения, вероятность разрушения, хрупкое разрушение.

В настоящее время существует американский стандарт [1] для нахождения вязкости разрушения в переходной области широкого класса перлитных сталей с диапазоном предела текучести $R_{p0,2} = 275 \dots 825$ МПа. На основе статистических представлений Вейбулла [2] для обработки экспериментальных данных, позволяющих определить температурную зависимость вязкости разрушения с заранее заданной границей достоверности (в процентах от допуска), положения документа [1] были экспериментально проверены на материале 15Х2НМФАА, применяемом при производстве корпусов атомных реакторов. Основными используемыми в расчете характеристиками материала являются критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} и критическая температура хрупкости T_k . Зависимости K_{Ic} от приведенной температуры $T - T_k$ представляют собой нижние огибающие поля разброса экспериментальных точек применяемых материалов и сварных соединений, полученные при испытании, как правило, компактных образцов значительной толщины (до 300 мм).

Для ферритных сталей и сварных соединений с диапазоном предела текучести $R_{p0,2} = 275 \dots 825$ МПа предложен иной способ получения температурных зависимостей для расчетов на сопротивление хрупкому разрушению [3]. В этой работе К. Валлин рассматривает его как стохастический процесс, при котором разброс данных по статической трещиностойкости в области хрупкого разрушения описывается распределением Вейбулла [2].

На основе работ [2, 3] Валлин разработал стандарт ASTM E 1921–97 для определения справочной температуры T_0 для ферритных сталей в переходной области [1]. Вероятность хрупкого разрушения

P_f при $K < K_{1c}$ для образца, выбранного случайным образом из партии, описывается по его представлениям трехпараметрической функцией распределения Вейбулла в виде [2, 3]

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

где $K_{\min} = 20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (минимальное значение K_{1c} для ферритных сталей); K_0 — параметр масштаба, зависящий от температуры и толщины образца,

$$K_0 = \left[\sum \frac{(K_{1ci} - K_{\min})^4}{(N - 0,3068)^{1/4}} \right] + K_{\min} \quad (1)$$

(N — число действительных результатов испытаний образцов, $N \geq 6$). Влияние толщины образца описывают зависимостью [1, 4]

$$\frac{K_{1cx} - K_{\min}}{K_{1cy} - K_{\min}} = \frac{B_y}{B_x},$$

где K_{1cx} , K_{1cy} — вязкости разрушения для образцов толщиной B_x и B_y , соответствующие одной и той же вероятности P_f .

Температурная зависимость K_{1c} в переходной области (мастер-кривая) для образцов СТ-1Т имеет вид

$$K_{1csp} = 30 + 70 \exp[0,019(T - T_0)], \quad (2)$$

где T — температура испытаний.

Рассчитав K_{1csp} по уравнению (2), можно определить справочную температуру T_0 , соответствующую значению $K_{1c} = 100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

В ЦНИИ «Прометей» разработана методика [5] прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения материалов корпусов реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 на основе требований ГОСТ 25.506–85 и стандарта ASTM E1921–97. Методика предназначена для прогнозирования влияния облучения при хрупком разрушении материалов. Согласно этой методике, введено понятие «базовая кривая», для которой

$$K_{1c}^*(T - T_k) = K_{1c}(T - T_k)$$

при $B = B^* = 150 \text{ мм}$, $P_f = 0,05$, т. е. кривая представляет собой зависимость $K_{1c}(T - T_k)$ для образцов толщиной $B = B^* = 150 \text{ мм}$ при ве-

роятности хрупкого разрушения $P_f = P_f^* = 0,05$. Следует отметить, что под K_{Ic} понимается вязкость разрушения, определяемая методами как линейной, так и нелинейной механики разрушения.

Базовая зависимость описывается уравнением вида

$$K_{Ic}^* = \alpha + \beta \exp[\gamma(T - T_k)]. \quad (3)$$

Для материалов корпусов реакторов 15X2МФА, 15X2МФАА, 15X2НМФА, 15X2НМФАА и их сварных швов $\alpha = 23 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, $\beta = 48 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, $\gamma = 0,019 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Считается, что для облученного материала в уравнении (3) изменяется только температура T_k , а параметры α , β и γ остаются теми же (что соответствует концепции горизонтального сдвига зависимости $K_{Ic}(T - T_k)$). Для облученного материала температуру T_k определяют по результатам испытаний маломасштабных образцов на вязкость разрушения при одном значении температуры.

Экспериментальная проверка представлений была проведена на основном материале натурной обечайки корпуса реактора ВВЭР-1000 из стали 15X2НМФАА. Для этого были изготовлены ударные образцы Шарпи и компактные образцы СТ-1/2Т.

Образцы Шарпи испытывали при температурах -70 , -80 и $-90 \text{ }^\circ\text{C}$. По усредненной зависимости ударной вязкости основного материала от температуры (рис. 1) была определена рекомендованная в работе [1] температура $77 \text{ }^\circ\text{C}$, соответствующая работе разрушения образца $A_{\text{раз}} = 28 \text{ Дж}$. С учетом поправки на размер [1] компактного образца СТ-1/2Т температура испытания составила $-105 \text{ }^\circ\text{C}$. При этой температуре компактные образцы СТ-1/2Т из основного материала испытывали на машине HUS2010 в теплоизолированной камере, охлаждаемой жидким азотом. Контроль заданной температуры осуществляли хромель-алюмелевой термопарой, головку которой прикрепляли к поверхности образца точечной сваркой вблизи вершины усталостной трещины. В ходе испытания автографически записывали диаграмму сила — смещение.

Определяли интеграл J_c как сумму упругой J_e и пластической J_p составляющих:

$$J_c = J_e + J_p.$$

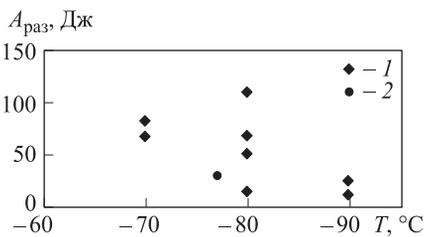


Рис. 1. Зависимость работы разрушения образцов Шарпи от температуры:

1 — образцы Шарпи; 2 — образцы СТ-1/2Т;

Упругую составляющую рассчитывали по формуле

$$J_e = K_e^2 / E,$$

где $K_e = \left[P / (BB_N W)^{1/2} \right] f(a_0/W)$; P — нагрузка на образце; B — толщина образца; B_N — толщина образца в нетто-сечении; W — расстояние от задней стенки образца до нетто-сечения;

$$f(a_0/W) = \left[(2 + a_0/W) / (1 - a_0/W)^{3/2} 0,886 + 4,64(a_0/W) - 13,32(a_0/W)^2 + 14,72(a_0/W)^3 - 5,6(a_0/W)^4 \right];$$

a_0 — начальный размер трещины; E — модуль упругости.

Пластическую составляющую определяли с помощью выражения

$$J_p = \eta A_p / B_N b_0,$$

где $\eta = 2 + 0,522 b_0/W$; A_p — работа пластической деформации,

$$A_p = A - 0,5C_0 P^2;$$

A — суммарная работа, включающая в себя упругую A_e и пластическую A_p составляющие,

$$A = A_e + A_p;$$

C_0 — податливость; b_0 — расстояние от начальной трещины до задней поверхности образца.

Вязкость разрушения K_{Ic} определяли по формуле

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

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

Справочную температуру для образцов СТ-1Т вычисляли как

$$T_0 = T - \frac{1}{0,019} \ln \frac{K_{Ic\text{cp}} - 30}{70},$$

где $K_{Ic\text{cp}}$ — среднее значение вязкости разрушения для образцов СТ-1Т, пересчитанное по результатам испытания образцов СТ-1/2Т по формуле

$$K_{Ic\text{cp}} = (K_0 - 20)(\ln 2)^{1/4} + 20;$$

K_0 — параметр, определяемый по формуле (1).

По результатам расчетов справочная температура T_0 для образцов СТ-1Т из основного металла составила $-100\text{ }^\circ\text{C}$, а для образцов СТ-6Т после пересчета результатов испытания образцов СТ-1/2Т $-68,8\text{ }^\circ\text{C}$.

Для построения мастер-кривой (см. выражение (2)), 5 и 95%-ные границы допуска вычисляли по формуле

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

где D_1 и D_2 — справочные коэффициенты (рис. 2).

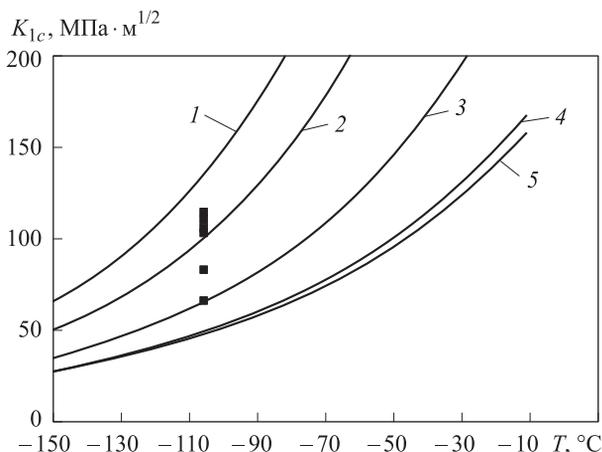


Рис. 2. Мастер-кривая и границы допуска для основного материала:

1, 3 — 95 и 5%-ные кривые для СТ-1/2Т соответственно; 2 — мастер-кривая; 4 — базовая кривая; 5 — 5%-ная кривая для СТ-6Т; ■ — экспериментальные точки для СТ-1/2Т

Следует отметить, что образцы СТ-1/2Т для основного металла были изготовлены из среднего кольца корпусной обечайки из стали 15Х2НМФАА, причем направление трещины в образцах было одинаковым. На рис. 2 видно, что все экспериментальные точки, обработанные в соответствии с методикой [1], расположились в поле, ограниченном нижней 5%-ной кривой допуска.

По методике ЦНИИ КМ «Прометей» базовую температурную зависимость $K_{1c}(T)$ определяют следующим образом.

1. Испытывают маломасштабные образцы толщиной $B = B_{исп}$ на вязкость разрушения при температуре $T = T_{исп}$.

2. На основании результатов испытаний определяют параметр масштаба

$$K_0 = \left[\sum \frac{(K_{1ck} - K_{\min})^4}{(N + \ln 2 - 1)^{1/4}} \right] + K_{\min},$$

где K_{1ck} — значение K_{1c} для k -го образца.

3. Определяют вязкость разрушения $K_{1c(0,05)}^{\text{исп}}$ для образца толщиной $B_{\text{исп}}$ при $T_{\text{исп}}$ и $P_f = P_f^* = 0,05$:

$$K_{1c(0,05)}^{\text{исп}} = \left[-\ln(1 - P_f^*) \right]^{1/4} (K_0 - K_{\min}) + K_{\min}.$$

4. По полученному значению $K_{1c(0,05)}^{\text{исп}}$ для образца толщиной $B_{\text{исп}}$ определяют вязкость разрушения для образца толщиной $B^* = 150$ мм при $P_f = P_f^* = 0,05$, т. е. значение K_{1c}^* при $T_{\text{исп}}$:

$$K_{1c}^* = \left(B_{\text{исп}} / B^* \right)^{1/4} \left(K_{1c(0,05)}^{\text{исп}} - K_{\min} \right) + K_{\min}.$$

5. По значению K_{1c}^* рассчитывают T_k :

$$T_k = T_{\text{исп}} - \frac{\ln(K_{1c}^* - \alpha) / \beta}{\gamma}.$$

6. При известном значении T_k строят базовую зависимость $K_{1c}^*(T)$ для облученного материала:

$$K_{1c}^* = \alpha + \beta \exp[(T - T_k)].$$

Для основного материала критическая температура хрупкости $T_k = -62,5$ °С (см. рис. 2).

Таким образом в методике Валлина температурную зависимость определяют через справочную температуру T_0 , а в методике ЦНИИ КМ «Прометей» — через критическую температуру хрупкости T_k . Базовая кривая в методике ЦНИИ КМ «Прометей» более консервативна, чем 5%-ная кривая в методике Валлина. Приведенное сопоставление экспериментально подтверждает возможность применения методик Валлина и ЦНИИ КМ «Прометей» для расчета на сопротивление хрупкому разрушению материалов отечественного корпуса реактора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ASTM E1921–97. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature T_0 for Ferritic Steels in the Transition Range. *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 03.01, pp. 1068–1084.
- [2] Weibull W.A. A statistical theory of strength material. *Poy. Swed. Inst. Eng. Res.*, 1939, vol. 151, pp. 5–45.

- [3] Wallin K. The scatter in K_{Ic} result. *Eng. Fract. Mesh*. 1984, vol. 19, pp. 149–163.
- [4] Wallin K. The size effect in K_{Ic} result. *Eng. Fract. Mesh*, 1985, vol. 22, pp. 149–163.
- [5] *Методики прогнозирования температурной вязкости разрушения материалов корпусов реакторов ВВЭР–440 и ВВЭР–1000 ЦНИИ КМ «Прометей»*. Санкт-Петербург, ЦНИИ КМ «Прометей», 2005.

Статья поступила в редакцию 03.04.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Силаев А.А., Силаева Н.А., Горбунов А.К., Логинова А.Ю. Определение температурной зависимости вязкости разрушения на основе концепций мастер-кривой и базовой кривой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/matsci/1266.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 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

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

Логинова Алла Юрьевна родилась в 1959 г., окончила МФ МХТИ им. Д.И. Менделеева в 1982 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

Determining the temperature dependence of fracture toughness on the basis of the master curve and the basic curve concept

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

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

This article examines the evaluation techniques of the temperature dependence of fracture toughness with a predetermined boundary. It shows a possibility of their appliance for the materials used in the manufacture of nuclear reactor vessels.

Keywords: master curve, basic curve, fracture toughness, fracture probability, brittle fracture.

REFERENCES

- [1] ASTM E1921–97. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature T_0 for Ferritic Steels in the Transition Range. *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 03.01, pp. 1068–1084.
- [2] Weibull W.A. A statistical theory of strength material. *Poy. Swed. Inst. Eng. Res.*, 1939, vol. 151, pp. 5–45.
- [3] Wallin K. The scatter in K_{Ic} result. *Eng. Fract. Mesh*. 1984, vol. 19, pp. 149–163.
- [4] Wallin K. The size effect in K_{Ic} result. *Eng. Fract. Mesh*, 1985, vol. 22, pp. 149–163.
- [5] *Metodiki prognozirovaniya temperaturnoy vyzkosti razrusheniya materialov korpusov reaktorov VVER-440 i VVER-1000 TsNII KM "Prometey"* [The technique of predicting temperature dependence of fracture toughness of materials destruction for WWER-440 and WWER-1000 reactor vessel materials CRISM "Prometheus"]. Sankt-Petersburg, TsNII KM "Prometheus", 2005.

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