

УДК 620.163.4:669.14.018:519.21

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОСТИ СТАЛЕЙ

© Ю. В. Желтов¹, Н. Г. Андреев¹, Ю. Г. Колесников¹, В. П. Морозов²

Статья поступила 27 января 2009 г.

Описана методика определения вероятностных параметров зависимостей ударной вязкости KCV и трещиностойкости K_{lc} от температуры для сталей сосудов давления. Она использует программу, которая выполняет оценку параметров нелинейной регрессии методом наименьших квадратов и тангенс-гиперболическую аппроксимацию средних значений экспериментальных данных, по отношению к которой распределения данных близки к нормальному закону. Программа позволяет вычислять параметры th -аппроксимации, стандартное отклонение, ширину доверительной полосы аппроксимации, коэффициент выборочной корреляции. Показано научное и прикладное значение применения разработанной методики.

Ключевые слова: сталь сосудов давления, ударная вязкость, трещиностойкость, нормальный закон распределения, толщина образцов, норматив.

Принятая методика определения температурных зависимостей ударной вязкости ($KCV(T)$) сталей [1] ограничивается вычислением методом наименьших квадратов параметров соотношения, характеризующего усредненные значения KCV при заданных температурах. При существующем программном обеспечении решение задачи аппроксимации экспериментальных данных ударной вязкости с использованием четырехпараметрического соотношения:

$$KCV(T) = A + B \operatorname{th}(C(T - \theta)) \quad (1)$$

требует назначения одного параметра, например, фиксированного минимального значения ударной вязкости образцов заданной геометрии. При назначении параметров применяют также методы Master Curve и Unified Curve определения кумулятивной вероятности P_f хрупкого разрушения образцов сталей в функции трещиностойкости $K_{lc}(T)$ [2, 3]. Эти методы используют распределение Вейбулла, базирующееся на представлениях о разрушении по слабейшему звену (что характерно для хрупкого разрушения), и постулируют соотношение

$$P_f(K_{lc}) = 1 - \exp\left[-\frac{K_{lc} - K_{min}}{K_0 - K_{min}}\right]^{1/4}. \quad (2)$$

Здесь минимальное значение статической вязкости $K_{min} \approx 20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; параметр масштаба $K_0 = \alpha + \beta \times \exp[\gamma(T - T_0)]$, где $\alpha + \beta = 108 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; константа материала $\gamma = 0,019$; T_0 — температура, которая соот-

ветствует $K_{lc} = 100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ при $P_f = 0,5$ и характеризует начало разрушения образцов путем скола [2]. Соотношение (2) при $\alpha = K_{min}$ используют для оценок температурных зависимостей $P_f(K_{lc}(T))$, для чего его преобразуют к виду

$$K_{lc} = K_{min} + N_f \beta \exp[\gamma(T - T_0)], \quad (3)$$

где значения параметра $N_f = \{-\ln(1 - P_f)\}^{1/4}$ для вероятностей P_f , равных 0,05; 0,5 и 0,95, составляют 0,4759; 0,9124 и 1,3156 соответственно.

Результаты использования методов Master Curve и Unified Curve представлены на рис. 1 [3]. Из него видно, что кривые, ниже которых должно находиться по крайней мере 5 % экспериментальных точек при $T \leq T_0 \approx -60^\circ\text{C}$, как правило, являются «100-процентными» огибающими [3, 4], причем эта тенденция более реализуется с повышением температуры. Последнее обусловлено, по-видимому, наблюдаемым при повышении температуры снижением значимости для разрушения материалов его хрупкой составляющей (ее характеризует вероятность P_f) и повышением роли вязкой составляющей. О последнем свидетельствует установленный для стали A533B нормальный характер распределения значений K_{lc} при температуре -80°C [5].

С целью повышения информативности результатов обработки экспериментальных данных ударной вязкости и трещиностойкости сталей возникла необходимость создания методики определения плотностей вероятности $P(KCV(T))$ и $P(K_{lc}(T))$ с минимальным использованием назначаемых параметров, как было ранее выполнено применительно к полосам прокаливаемости сталей [6], а также обработки экспериментальных данных $KCV(T)$ и $K_{lc}(T)$, распределения которых при $T = \text{const}$ имеют существенную нормальную компоненту.

¹ ОАО «ОКБМ АФРИКАНОВ», г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: romantsov@okbm.nnov.ru

² Нижегородский филиал Государственного университета — Высшая школа экономики, г. Нижний Новгород, Россия.

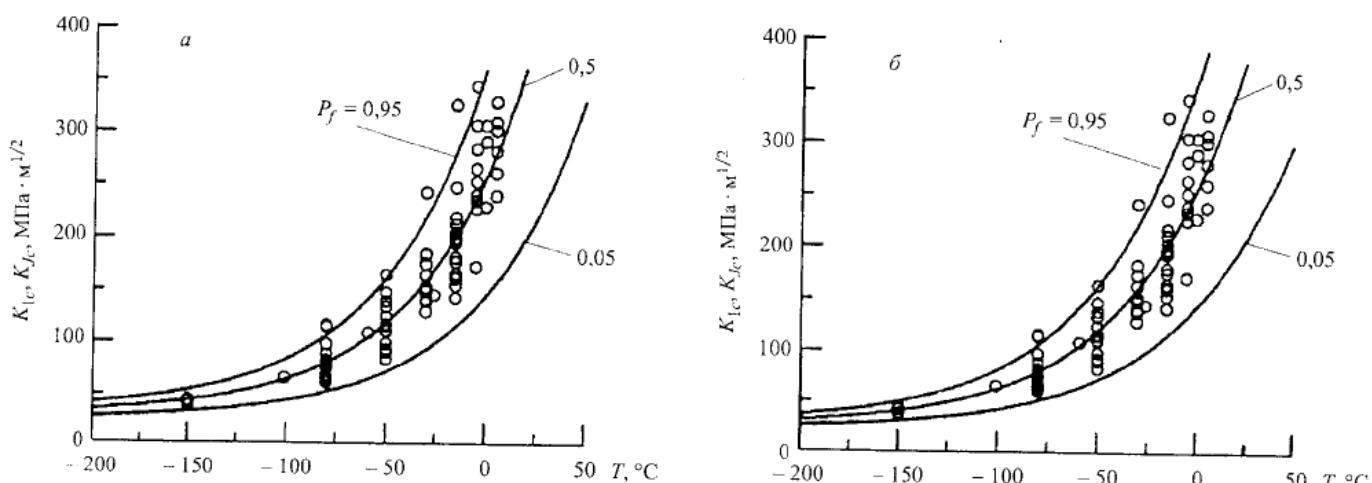


Рис. 1. Вероятностные температурные зависимости трещиностойкости материала сварного шва стали HSST в исходном состоянии, полученные с использованием методов Master Curve (а) и Unified Curve (б) [3]

Математическая модель методики

Разработанная методика исходила из наглядного представления о том, что значения вероятностей $P(K_{Ic}(T))$ или $P(KCV(T))$ образуют структурные рельефы над плоскостями множеств экспериментальных значений $K_{Ic}(T)$ или $KCV(T)$, причем эти рельефы могут быть отображены на плоскости в виде проекций, подобных изображениям рельефов местности на топографической карте. Создание методики определения вероятностных зависимостей $KCV(T)$ и $K_{Ic}(T)$ потребовало разработки вполне формализованного способа решения задачи аппроксимации вида (1). Здесь параметры аппроксимирующей кривой по известным множествам значений ударной вязкости или трещиностойкости (y) и температуры (t) определялись путем минимизации функционала вида

$$I(A, B, C, 0) = \sum_{i=1}^N (y_i - A - B \operatorname{th}\{C(T_i - \theta)\})^2. \quad (4)$$

После его минимизации по A и B при заданных C и θ функционал приобретает вид

$$I(\theta, C) = S_{yy} - S_{yt}^2 / S_{tt}, \quad (5)$$

$$\text{где } S_{yy} = \frac{1}{n} \sum_i (y_i - \bar{y})^2; S_{yt} = \frac{1}{n} \sum_i (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t}); \\ S_{tt} = \frac{1}{n} \sum_i (t_i - \bar{t})^2; \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i y_i; \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_i t_i; \\ t_i = \operatorname{th}\{C(T_i - \theta)\}.$$

Параметры функционала $I(\theta, C)$ находили методом прогонки в плоскости (θ, C) с выбором значений, при которых $I(\theta, C)$ минимален. В результате была получена матрица

$$\begin{pmatrix} 2 & 2\bar{t} \\ 2\bar{t} & 2\bar{t}^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

с детерминантой $\Delta = 4(\bar{t}^2 - \bar{t}^2) = 4S_{tt} > 0$ и положительными диагональными элементами. Задача своди-

лась к двухпараметрическому виду линейной зависимости аппроксимирующего функционала от параметров A и B [7].

Разработанная модель компьютерной программы использовала гипотезу (с последующей ее проверкой) возможности построения аппроксимационных кривых вида (1), по отношению к которым распределения экспериментальных точек приближены к нормальному [7]. Известно, что метод наименьших квадратов обосновывается (по Гауссу) тем, что «кубыток» от замены физической величины μ ее приближенным значением X , вычисленным по результатам наблюдений, пропорционален квадрату ошибки $(X - \mu)^2$. При этом оптимальная оценка X подчиняется нормальному распределению со средним значением μ и дисперсией σ , а следовательно, плотность вероятности случайной величины X

$$P(x, \mu, \sigma) = (2\pi\sigma)^{-1/2} \exp[-(1/2\sigma^2)(x - \mu)^2] \quad (7)$$

при $x = X$ достигает максимума в точке $\mu = X$ [8]. Возможность построения аппроксимационных кривых, по отношению к которым распределения экспериментальных точек $K_{Ic}(T)$ приближены к нормальному, обосновывалась показанным для сталей по методике J. F. Knott [5] нормальным характером распределений этих точек при $T = \text{const}$ в диапазоне $T \geq -80^\circ\text{C}$.

Полученная на основе указанных предпосылок программа позволила вычислять параметры аппроксимации вида (1), а также стандартное отклонение (σ^2), ширину доверительной полосы аппроксимации с надежностью 0,95, в частности ее минимальную величину ($\pm Z_{\min}$) и коэффициент выборочной корреляции (r). Кроме того, с использованием критерия Пирсона для нормальных распределений программа выполняла проверку нормальности распределений экспериментальных данных характеристик вязкости сталей по отношению к аппроксимационным th-кривым в целом по массивам данных. Кроме компьютерных вычислений, подсчитывались «вручную» количества экспериментальных точек, размещенных ниже (и выше) уровня

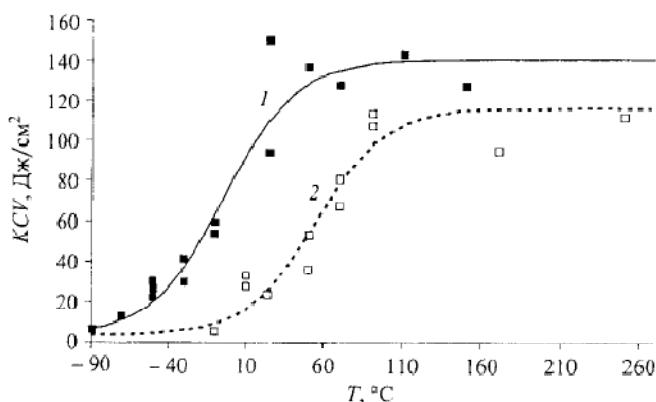


Рис. 2. Температурные зависимости ударной вязкости стали 15Х2МФА в исходном состоянии (1) и после нейтронного облучения флюенсом $F = 9,7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$ (2) [9]

аппроксимационной кривой согласно правилу «1,65 сигм», которое предполагает выход за этот уровень 10 (5) % значений экспериментальных данных при двустороннем (одностороннем) нормальному распределении. Верификация и апробация программы выполнялись на имеющихся массивах экспериментальных данных $KCV(T)$.

Разработанная методика позволила также количественно оценить изменение дисперсии значений $KCV(T)$ стали 15Х2МФА под действием нейтронного облучения [9] (рис. 2). Для исходного и облученного состояний стали были получены σ , равные 13 и 9,8 МПа · м^{1/2} соответственно при постоянном значении коэффициента выборочной корреляции ($r = 0,97$), что указывало на слабую зависимость разброса значений ударной вязкости стали от нейтронного флюенса.

Методика оценки вероятностных параметров зависимости $K_{lc}(T)$ для сталей

Разработанная методика была применена к массивам данных, характеризующих температурную зависимость трещиностойкости K_{lc} различных марок сталей сосудов давления [3, 10], в частности, к представленному на рис. 3 массиву. Из множества данных на рис. 3 было выбрано подмножество, соответствующее толщине образцов $B = 150$ мм ($N = 51$). Для него вычислены параметры вероятностной структуры ($A = 174 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $B = 139 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; $C = 0,015 (\text{°C})^{-1}$; $\theta = 25 \text{ °C}$), по которым построена аппроксимационная зависимость вида (1), а также $\sigma = 22,6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, $Z_{\min} = 8,07 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, $r = 0,95$. Полученные кривые, соответствующие правилу «1,65 сигм», отсекали от этого массива три точки «сверху» и четыре «снизу», удовлетворительно отвечая этому правилу (рис. 4).

Использование критерия Пирсона подтвердило нормальный характер распределения экспериментальных точек исследуемого подмножества по отношению к полученной аппроксимационной th -кривой. Анализ гистограмм плотности распределения вероятности экспериментальных точек $K_{lc}(T)$, выполненный для

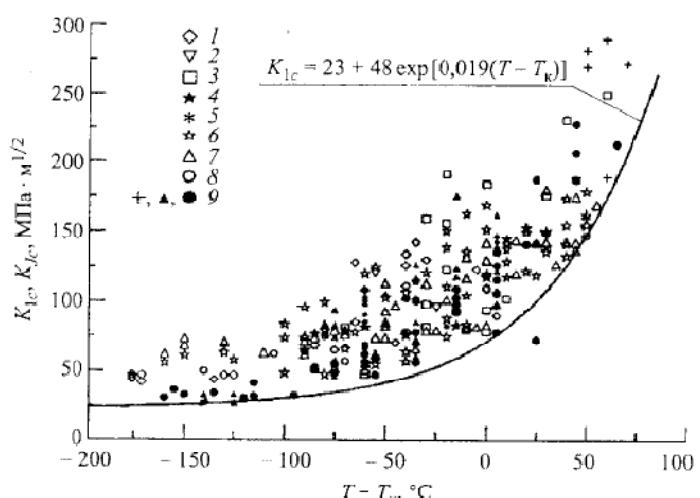


Рис. 3. Зависимость трещиностойкости K_{lc} от приведенной температуры $T - T_k$ для стали 15Х2НМФА при толщине B экспериментальных образцов [10], равной 10 (1), 12 (2), 25 (3), 30 (4), 40 (5), 50 (6), 75 (7), 100 (8), 150 мм (9)

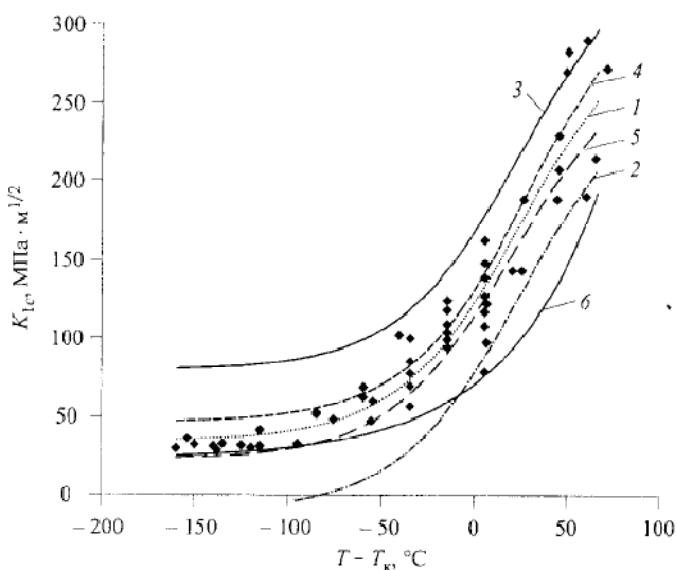


Рис. 4. Результаты анализа вероятностной структуры температурной зависимости экспериментальных значений трещиностойкости стали 15Х2НМФА в исходном состоянии ($B = 150$ мм, $N = 51$) [11]: 1 — аппроксимационная кривая для усредненных значений трещиностойкости; 2 и 3 — границы областей минимальных и максимальных (согласно зависимости (9)) значений трещиностойкости по правилу «1,65σ»; 4 и 5 — границы областей изменения доверительной полосы аппроксимации с надежностью 0,95; 6 — кривая, соответствующая нормативной зависимости (8); точки — экспериментальные данные

13 массивов данных $K_{lc}(T)$ [3] и массива данных $K_{lc}(T - T_k)$ [10] (общее количество экспериментальных точек около 600), не обнаружил устойчивой их асимметрии [11].

Методика позволила оценить зависимость трещиностойкости сталей от толщины изделий. Для этого в массиве данных (см. рис. 3) были рассмотрены подмножества, соответствующие различной толщине образцов. Результаты их статистической обработки представлены в таблице и на рис. 5. Для всех исследованных подмножеств (при $N \geq 25$) показан нормальный закон

Статистические характеристики массивов экспериментальных данных $K_{Ic}(T - T_k)$ для стали 15Х2НМФА при толщине образцов $B = 10 \div 75$ мм

Толщина образцов, N мм	σ , МПа · м $^{1/2}$	A , МПа · м $^{1/2}$	B , МПа · м $^{1/2}$	θ , °С	C , (°С) $^{-1}$
75	35	16,8	119	52,6	1,6
50	42	23,9	113	52,6	-20
25	15	40	183	60,9	30,4
10	22	16,4	81,6	35,7	-77
					0,0177
					0,0147
					0,139
					0,04

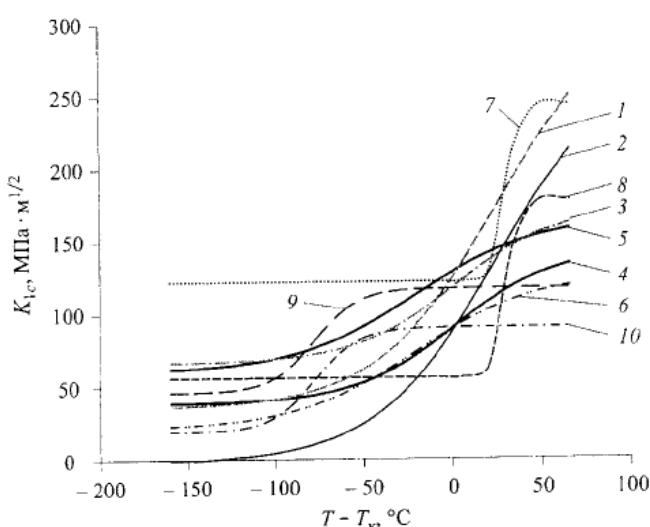


Рис. 5. Температурные зависимости трещиностойкости для стали 15Х2НМФА: аппроксимационные th-зависимости для усредненных значений K_{Ic} (1, 3, 5, 7, 9) и граница минимальных значений K_{Ic} по правилу «1,65 сигма» (2, 4, 6, 8, 10) для образцов, толщиной B , равной 150 (1, 2), 75 (3, 4), 50 (5, 6), 25 (7, 8), 10 мм (9, 10)

распределения экспериментальных точек по отношению к аппроксимационным th-кривым, а также подтверждено выполнение для них правила «1,65 сигма».

Из рис. 5 видно, что в низкотемпературном интервале испытаний минимальной усредненной трещиностойкостью ($K_{Ic} \approx 40$ МПа · м $^{1/2}$) обладали образцы толщиной $B = 150$ мм, а максимальной ($K_{Ic} \approx 120$ МПа · м $^{1/2}$) — толщиной $B = 25$ мм. Образцы остальных толщин имели промежуточные значения трещиностойкости. Этот результат приблизенно соответствовал известной для указанного температурного интервала тенденции [13] повышения значений K_{Ic} с уменьшением толщины образцов по степенному закону с показателем, равным 1/4; однако эту тенденцию характеризует высокий, иногда даже «смазывающий» ее разброс экспериментальных данных. Напротив, в температурном интервале $T - T_k \geq 20$ °С наибольшей трещиностойкостью обладали образцы толщиной 150 и 25 мм, а образцы других значений толщины имели пониженные показатели K_{Ic} . Этот результат соответствовал отмеченному в работе [12] эффекту ослабления влияния толщины образцов на их трещиностойкость, если стали находятся в пластичном состоянии. Таким образом,

методика позволила выявить существенное отличие функций $K_{Ic}(T - T_k)$ в зависимости от толщины испытываемых образцов при криогенных и положительных температурах испытаний.

Было проверено, насколько соответствует полученным результатам рекомендованная нормами [13] расчетная зависимость для допустимых значений трещиностойкости вида

$$K_{Ic}(T) [\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}] = 23 + 48 \exp(0,019(T - T_k)). \quad (8)$$

Согласно методологии норм, эта зависимость должна характеризовать с вероятностью 95 % нижнюю огибающую массива экспериментальных значений $K_{Ic}(T - T_k)$ стали 15Х2НМФА [10, 12] при толщине образцов $B = 150$ мм. Однако, как видно из рис. 3, нормативная кривая является фактически «100-процентной» огибающей. В связи с этим полученную кривую, соответствующую правилу «1,65 сигма», сравнивали с нормативной зависимостью (8) (см. рис. 4). Результаты показали, что построенная по разработанной методике кривая удовлетворительно соответствует охвату 95 % экспериментальных данных и имеет аналитический вид

$$K_{Ic}(T) [\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}] = 137 + 139 \text{th}(0,015(T - T_k - 25)). \quad (9)$$

Она смешена (в области $T - T_k \geq 0$ °С) на ≈ 20 °С в сторону пониженных температур, что связано, по-видимому, с вкладом в экспериментально измеряемые значения $K_{Ic}(T)$ исследованной стали их вязкой составляющей.

Таким образом, разработана методика определения плотности вероятности экспериментальных данных ударной вязкости $KCV(T)$ и трещиностойкости $K_{Ic}(T)$ сталей сосудов давления. Она предусматривает оценку параметров нелинейной регрессии методом наименьших квадратов и тангенс-гиперболическую аппроксимацию средних значений экспериментальных данных, по отношению к которой распределения данных вязкости близки к нормальному закону. Методика апробирована в приближении слабой зависимости разброса экспериментальных данных характеристик вязкости сталей от температуры. Она может меняться в условиях испытаний, когда распределения экспериментальных данных ударной вязкости и трещиностойкости сталей при $T = \text{const}$ приближены к нормальному. Если указанные распределения отличны от нормальных, ее применение ограничено.

Авторы приносят благодарность Н. В. Маковееву за оперативно представленные экспериментальные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

- ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 700 с.

2. ASTM E 1921-03. Standard test method for determination of reference temperature, T_g , for ferritic steels in the transition range // Annual Book of ASTM Standard. 2003. Vol. 03.01. P. 1 – 19.
3. Мартолин Б. З., Гуленко А. Г., Николаев В. В., Рядков Л. Н. Новый инженерный метод прогнозирования температурной зависимости трещиностойкости сталей для сосудов давления / Проблемы прочности. 2003. № 5. С. 12 – 27.
4. Wallin K. Master curve analysis of ductile to brittle transition region fracture toughness round robin data. The «EURO» fracture toughness curve. Espoo 1998. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 367. P. 27 – 39.
5. Knott J. F. Probabilistic aspects of brittle fracture in pressure-vessel steels. — SIF 2004 Structural Integrity and Fracture; <http://eprint.uq.edu.au/archive/00000836>.
6. Желтов Ю. В., Косоногова С. А., Дутышев В. Н. О методиках прогнозирования твердости в сечениях стальных изделий / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2000. Т. 66. № 5. С. 54 – 56.
7. Желтов Ю. В., Морозов В. П., Андреев Н. Г. Разработка вполне формализованного способа аппроксимации экспериментальных данных по радиационному охрупчиванию сталей / Труды VII Международной конференции «Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» (17 – 21 июня 2002 г.). — С.-Петербург: Прометей, 2002. Т. 1. С. 428 – 431.
8. Наименьших квадратов метод: Математический энциклопедический словарь. — М.: СЭ, 1988. — 850 с.
9. Valek Š, Haasild P, Kytká M. Mechanisms of Fracture in Neutron-Irradiated 15Cr2MFA Steel / Проблемы прочности. 2008. № 3. С. 113 – 116.
10. Горынин И. В., Тимофеев Б. Т., Сорокин А. А. Вероятностный анализ механических свойств материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 / Проблемы прочности. 2006. № 2. С. 23 – 30.
11. Желтов Ю. В., Морозов В. П., Андреев Н. Г. Исследование вероятностной структуры температурной зависимости трещиностойкости K_{Ic} сталей сосудов давления с использованием тангенс-гиперболической аппроксимации / Сборник докладов VIII Российской конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 21 – 25 мая 2007 г. — Димитровград: НИИАР, 2008. Секция 2. С. 582 – 596.
12. Wallin K. The size effect in K_{Ic} results / Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 22. N. 1. P. 156 – 160.
13. Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов корабельных атомных паропроизводящих установок с водо-водяными реакторами. Н-ППУ-01. — М.: Энергоатомиздат, 2002. — 400 с.

УДК 620.193.16

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННО-КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НАПЛАВЛЕННОЙ СТАЛИ 06Х23Н18М5, МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ ИТТРИЕМ

© А. В. Патюкин, А. С. Рудычев, Е. В. Федосеев, А. Г. Александров¹

Статья поступила 19 мая 2009 г.

Описаны способы и результаты исследования кавитационно-коррозионной стойкости наплавленной стали 06Х23Н28М5, микролегированной иттрием. Кавитационно-коррозионные испытания проведены на установке для ускоренных кавитационно-коррозионных испытаний (УККИ) в 92-процентной H_2SO_4 в течение 6 ч, а кавитационно-коррозионно-абразивные испытания — на ударно-эрзационном стенде (УЭС) в 42-процентной H_3PO_4 в течение 10 ч. Путем металлографического исследования испытанных образцов установлен механизм кавитационно-коррозионного и кавитационно-коррозионно-абразивного изнашивания нержавеющих сталей и сплавов. При помощи электронной микроскопии в пластичной матрице обнаружены мелкодисперсные частицы σ -фазы и сложные карбиды, которые положительно влияют на кавитационно-коррозионную стойкость стали 06Х23Н28М5, микролегированной иттрием.

Ключевые слова: кавитационно-коррозионная стойкость, коррозионная стойкость, наплавленная сталь, микролегирование, иттрий, σ -фаза, дисперсионное упрочнение, контактная прочность.

При восстановлении деталей гидротехники, подверженных кавитационному воздействию агрессивных сред, к наплавленному металлу предъявляются особенно высокие требования. В то же время главными критериями качества остаются прочностные, пластические, кавитационные и коррозионные характеристики применяемых сплавов. Получение наплавленного слоя с необходимыми служебными свойствами возможно при

условии понимания процессов, в результате которых происходит изнашивание деталей. Цель данной работы — исследование механизма кавитационного воздействия серной и фосфорной кислот, а также кавитационно-коррозионной стойкости стали 06Х23Н18М5, микролегированной иттрием.

Была проведена серия лабораторных испытаний образцов наплавленного металла, аналогичного стандартным нержавеющим сталим и сплавам, рекомендованным для работы в условиях кавитации и коррозии в растворах серной и фосфорной кислот с наличием аб-

¹ ООО ПНО «Трубопроводы Гидротранспорта», г. Балашиха, Россия; e-mail: rудис5@rambler.ru