

Прогнозирование температурной зависимости вязкости разрушения жаропрочной стали 12Cr–2Ni–Mo

В. В. Покровский^а, С. Б. Кулишов^б, В. Г. Сидяченко^а, В. Н. Ежов^а,
В. С. Замотаев^а

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

^б ГП НПКГ “Заря-Машпроект”, Николаев, Украина

Исследовано влияние температуры и размера образцов на характеристики статической трещиностойкости жаропрочной стали 12Cr–2Ni–Mo. Показано, что в диапазоне температур 20...450°C увеличение толщины образцов приводит к незначительному повышению вязкости разрушения, полученной по 5%-ной секущей в соответствии со стандартами по определению характеристик трещиностойкости. Расчет характеристик трещиностойкости с учетом эффекта масштаба по разработанной ранее расчетно-экспериментальной модели для стали 12Cr–2Ni–Mo свидетельствует об удовлетворительном соответствии эксперименту во всем исследованном диапазоне температур.

Ключевые слова: вязкость разрушения, жаропрочная сталь, коэффициент интенсивности напряжений, эффект масштаба.

Постановка задачи исследования. Одними из наиболее нагруженных конструктивных элементов газотурбинных установок (ГТУ) являются диски. Их разрушение не локализуется в корпусе изделия и может привести к катастрофическому разрушению. При переходе от ступицы к ободу размеры поперечного сечения диска изменяются. Кроме того, его ободная часть содержит большое число концентраторов напряжений в виде “елочных” пазов, отверстий для охлаждающего воздуха и креплений балансировочных грузиков, различные фрезеровки и др., которые при эксплуатации служат инициаторами зарождения трещин. Для исключения внезапных разрушений дисков предлагается применять концепцию эксплуатации ГТУ “по техническому состоянию”. Для обоснованного назначения объемов и сроков проведения регламентных работ необходимо экспериментально исследовать характеристики трещиностойкости материала диска при различных режимах нагружения с учетом условий эксплуатации (температуры) и конструктивных особенностей изделия (размеры и форма).

Анализ литературных источников показывает, что форма и размеры тела могут значительно влиять на характеристики трещиностойкости. Поэтому важной и актуальной задачей механики разрушения является прогнозирование влияния эффекта масштаба на величину статической и циклической вязкости разрушения, а также обоснование возможности использования критических значений характеристик трещиностойкости, полученных на лабораторных образцах, для оценки вязкости разрушения реального конструктивного элемента – диска.

Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании температурной зависимости статической вязкости разрушения жаропрочной

дисковой стали 12Cr–2Ni–Mo в эксплуатационном диапазоне температур 20...450°C на компактных образцах толщиной 25 (СТ-1) и 10 мм (СТ-0,5). Кроме того, на основе этого проводилось опробование разработанной ранее [1] методики прогнозирования вязкости разрушения крупногабаритных образцов по результатам испытания образцов с трещинами малых размеров.

Результаты экспериментов и их анализ. Вязкость разрушения при статическом растяжении компактных образцов толщиной 25 и 10 мм исследовалась в соответствии с рекомендациями отечественных и зарубежных стандартов [2, 3] в диапазоне температур 20...450°C.

Значения критических коэффициентов интенсивности напряжений рассчитывались по диаграммам нагрузка–перемещение по линии действия силы: по 5%-ной секущей ($P_Q^{5\%}$) и по максимальной нагрузке (P_{max}), соответствующей разрушению образца. Анализ полученных данных показывает, что для образцов толщиной 10 и 25 мм различие между $K_Q^{5\%}$ и K_{max} составляет 10...20% (рис. 1), причем с повышением температуры испытаний наблюдается тенденция к увеличению отношения $K_{max}/K_Q^{5\%}$.

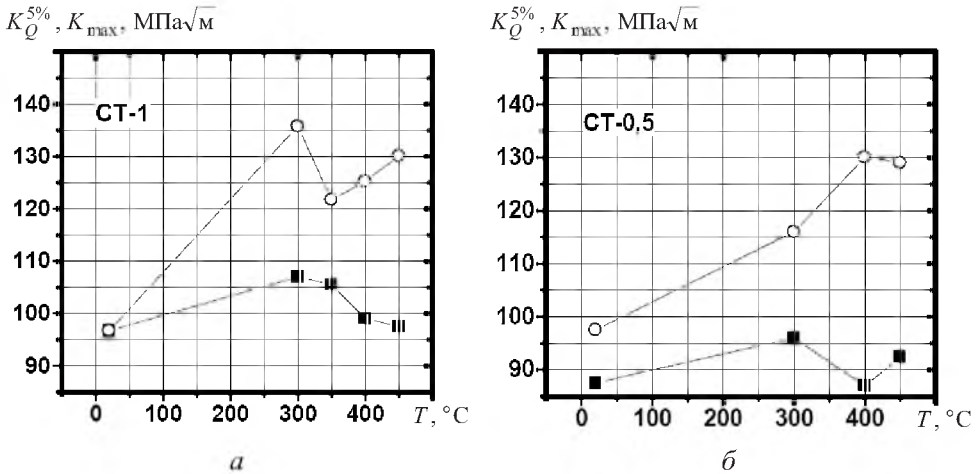


Рис. 1. Температурные зависимости статической трещиностойкости, полученные по 5%-ной секущей ($K_Q^{5\%}$) – темные точки и по нагрузке при разрушении (K_{max}) – светлые точки для образцов толщиной 25 (а) и 10 мм (б).

Характеристики вязкости разрушения при статическом нагружении приведены в табл. 1. Анализ выполнения условий плоской деформации в соответствии с рекомендациями [2] свидетельствует о том, что частично они соблюдаются лишь для образцов толщиной 25 мм при температуре 20°C (линейная диаграмма нагрузка–смещение). Таким образом, оценивать разрушение конкретных изделий с трещиноподобными дефектами (в частности, дисков ГТУ) из стали 12Cr–2Ni–Mo необходимо с помощью характеристик трещиностойкости, полученных на образцах соответствующей изделию толщины, которые испытывались при эксплуатационных температурах. При этом следует использовать значения коэффициентов интенсивности напряжений, полученные по 5%-ной секущей, что будет идти в запас по трещиностойкости изделия.

Т а б л и ц а 1

Данные испытаний на вязкость разрушения компактных образцов при различных температурах

$T, ^\circ\text{C}$	$l_{\text{cp}}, \text{мм}$	$P_Q^{5\%}, \text{кН}$	$P_{\text{max}}, \text{кН}$	$K_Q^{5\%}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$K_{\text{max}}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\frac{P_{\text{max}}}{P_Q^{5\%}}$	$2,5 \left(\frac{K_Q^{5\%}}{\sigma_{0,2}} \right)^2$
20	21,00	70,40	70,40	96,70	96,7	1,00	37,9
	16,12	16,24	18,17	87,54	97,5	1,12	38,9
300	34,70	29,46	37,23	107,00	135,8	1,26	60,5
	14,98	19,53	23,70	96,00	116,0	1,20	72,3
350	35,10	27,10	31,26	105,50	121,7	1,15	61,3
	15,83	17,02	23,80	89,00	125,0	1,40	—
400	32,20	34,48	43,46	99,00	125,2	1,26	55,6
	16,72	15,00	22,35	87,00	130,0	1,49	59,8
450	33,20	30,60	40,80	97,50	130,1	1,33	66,0
	16,86	16,12	22,00	92,36	129,0	1,40	59,2

Примечания. Над чертой приведены данные для образцов СТ-1, под чертой – для образцов СТ-0,5; l_{cp} – средняя длина трещины.

При переходе от компактных образцов толщиной 25 мм к образцам толщиной 10 мм пластические свойства стали проявляются больше, что выражается в губах среза на поверхностях изломов, которые имеют место даже при температуре 20°C. Наблюдается общая тенденция влияния толщины образца на характеристики трещиностойкости, полученные по 5%-ной секущей при различных температурах. Вязкость разрушения для образцов толщиной 25 мм в среднем на 10% выше таковой для образцов толщиной 10 мм (рис. 2).

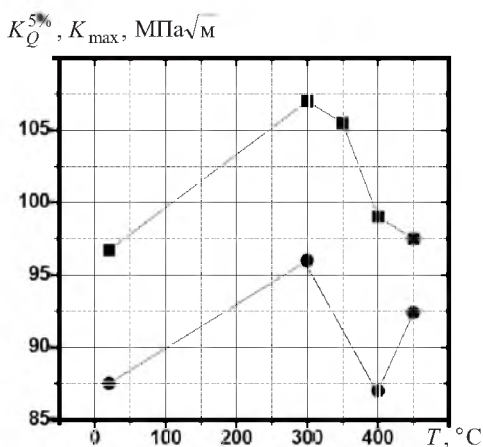


Рис. 2. Температурная зависимость характеристик статической трещиностойкости, полученная на компактных образцах СТ-1 толщиной 25 мм (■) и СТ-0,5 толщиной 10 мм (●).

Полученные результаты согласуются с многочисленными данными, приведенными в литературных источниках [4], где отмечается, что при изменении размера образца критические характеристики трещиностойкости могут

либо увеличиваться, либо уменьшаться, либо оставаться неизменными. Как будет показано ниже, это зависит от специфических механических свойств материала: критической деформации ε_f как функции трехосности напряженного состояния σ_m/σ_i и интенсивности локальной пластической деформации ε_i^p как параметра, который является функцией трех главных напряжений и определяет степень приближения к условиям плоской деформации.

Расчетно-экспериментальная модель прогнозирования эффекта масштаба. На основании представленных ранее [4] экспериментальных данных о трещиностойкости конструкционных материалов разных категорий прочности была разработана методика, позволяющая прогнозировать вязкость разрушения на верхнем шельфе температурной зависимости с учетом влияния напряженного состояния, которая опробована в настоящей работе для стали 12Cr–2Ni–Mo.

Методика основана на физико-механической модели вязкого разрушения, контролируемого достижением пластической деформацией в вершине трещины критического значения ε_f . Разработанная модель имеет две модификации: одна позволяет прогнозировать вязкость разрушения крупногабаритных тел по результатам испытаний только малых цилиндрических образцов без трещин (гладкие и с кольцевой выточкой), другая – по результатам испытаний малых цилиндрических образцов и малых образцов с трещиной.

Для принятой модели условие разрушения описывается следующим выражением:

$$\varepsilon_i^p(x) \Big|_{x=X_c} = \varepsilon_f, \quad (1)$$

где ε_f и ε_i^p – соответственно критическая деформация и интенсивность локальной пластической деформации в вершине трещины; X_c – характеристическое расстояние.

Между критической деформацией ε_f и трехосностью напряженного состояния σ_m/σ_i существует функциональная зависимость, которая удовлетворительно описывается уравнением, предложенным Бриджменом [5]:

$$\varepsilon_f = C_f \exp\left(-k_f \frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right) + \varepsilon_{If}, \quad (2)$$

где σ_m – гидростатическое напряжение; σ_i – интенсивность напряжений. Влияние размеров и формы тела на критическую деформацию может учитываться через их влияние на трехосность напряженного состояния.

Ниже без выводов промежуточных зависимостей, которые подробно описаны ранее [1], представлены только конечные формулы для определения принципиально важных параметров, на которых базируется предложенная модель.

Параметр χ определяется путем решения трехмерной упругой задачи:

$$\chi = \frac{\sigma_3}{\nu(\sigma_1 + \sigma_2)}, \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения у вершины трещины; ν – коэффициент Пуассона.

При плоском напряженном состоянии (ПНС) имеем $\chi = 0$, при плоском деформированном состоянии (ПДС) – $\chi = 1$, в общем трехмерном случае – $0 \leq \chi \leq 1$. Уравнение для прогнозирования вязкости разрушения запишем в виде

$$J_c = \left[C_f \exp\left(-k_f \frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right) + \varepsilon_{1f} \right]^{n+1} X_c M_f (1 - 2\chi\nu)^{-2}, \quad (4)$$

где

$$M_f = \frac{3\pi A}{1 + \nu};$$

n, A – коэффициенты уравнения $\sigma_i = A\varepsilon_i^n$, описывающего кривую деформирования материала.

В отличие от ранее известных зависимостей вязкости разрушения от критической деформации в уравнении (4) присутствуют параметры σ_m/σ_i и χ , учитывающие влияние напряженного состояния на критическую деформацию и на предысторию процесса деформирования. Для конкретных размеров и формы тела определяют значения σ_m/σ_i и χ , с помощью которых можно прогнозировать вязкость разрушения по известным константам материала $A, n, \nu, C_f, k_f, \varepsilon_{1f}$, полученным при испытании цилиндрических образцов на одноосное растяжение (гладких и с концентраторами).

Кроме зависимости (4), основанной на результатах испытаний образцов без трещин, получена зависимость для прогнозирования вязкости разрушения крупногабаритных тел по данным испытаний малых лабораторных образцов с трещиной при условии, что в них соблюдаются условия ПНС ($\chi_1 \rightarrow 0$):

$$(J_c)_2 = (J_c)_1 \frac{\left[C_f \exp\left[-k_f \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right)_2 + \varepsilon_{1f}\right] \right]^{n+1}}{\left[C_f \exp\left[-k_f \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_i}\right)_1 + \varepsilon_{1f}\right] \right]^{n+1}} (1 - 2\chi_2\nu)^{-2}. \quad (5)$$

Из этой зависимости следует, что для прогнозирования вязкости разрушения крупногабаритного тела кроме вязкости разрушения $(J_c)_1$ малого образца и констант $C_f, k_f, \varepsilon_{1f}, n, A$ необходимо располагать параметрами σ_m/σ_i и χ . Согласно зависимости (5) предполагаются дополнительные испытания малых образцов с трещиной, но при этом нет необходимости определять характеристическое расстояние X_c .

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными. Для исследования влияния напряженного состояния на критическую деформацию ε_f использовались цилиндрические образцы с различными радиусами кольцевых выточек ($R = 1, 2$ и 4 мм), для которых трехосность напряженного состояния σ_m/σ_i и значение ε_f рассчитывались по формулам Бриджмена [5]:

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_i} = \frac{1}{3} + \ln\left(\frac{d_k}{4R_k} + 1\right); \quad (6)$$

$$\varepsilon_f = 2 \ln\left(\frac{d_0}{d_k}\right), \quad (7)$$

где d_0 – диаметр рабочей части образца до нагружения; d_k – диаметр рабочей части образца после разрушения; R_k – радиус в вершине концентратора после разрушения.

Зависимость критической деформации ε_f от трехосности напряженного состояния при различных температурах приведена на рис. 3. Видно, что критическая деформация является убывающей функцией трехосности напряженного состояния, которая может быть принята в виде экспоненциального уравнения типа (2) с параметрами C_f , k_f , ε_{If} .

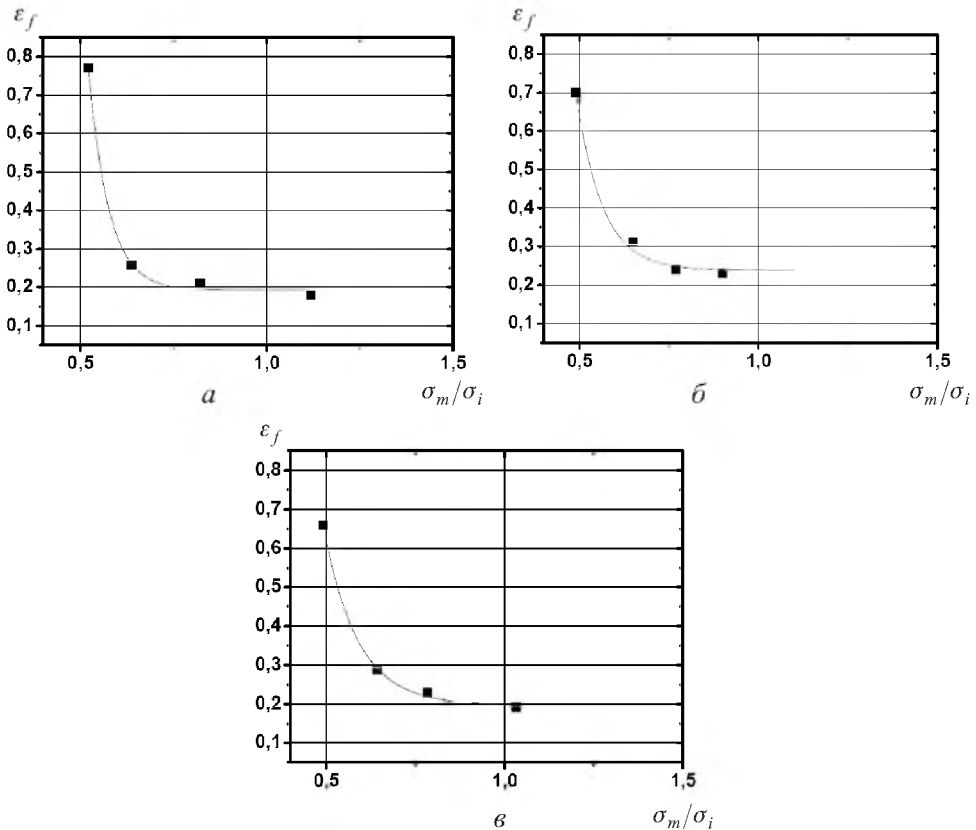


Рис. 3. Зависимость критической деформации от трехосности напряженного состояния при температуре 20 (а), 300 (б) и 400°С (в).

В соответствии с методикой прогнозирования вязкости разрушения для использования формул (4) и (5) необходимо знать распределение параметров χ и σ_m/σ_i по фронту трещины.

При нахождении значений параметра χ решалась трехмерная линейно-упругая задача, где главные напряжения у фронта трещины в компактных образцах толщиной 10 и 25 мм определялись с помощью конечноэлементного (КЭ) программного комплекса ANSYS. Ввиду симметрии образца при расчете строилась модель 1/4 образца (рис. 4). Трещина моделировалась с ограничением перемещения в направлении оси OY (рис. 4). Нагрузка прикладывалась по линии действия силы, задавая перемещения узлов в направлении оси OY . При решении данной задачи использовался восьмиузловой призматический элемент размером $0,055 \times 0,055 \times 0,36$ мм.

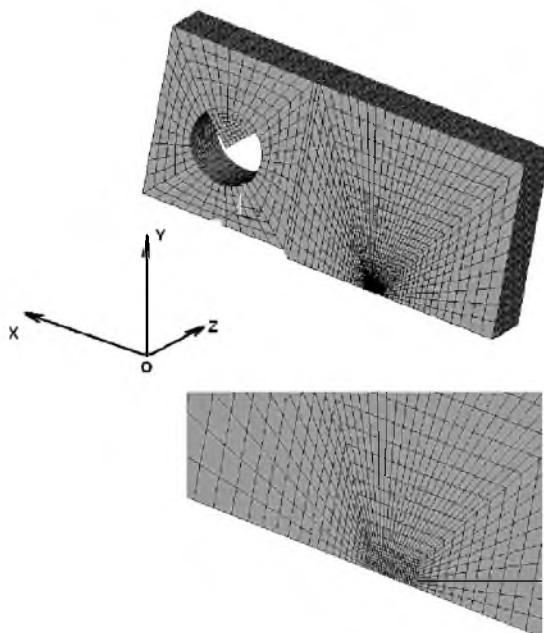


Рис. 4. Конечноэлементная модель образца СТ-0,5.

На рис. 5 представлено распределение параметра χ по толщине образца СТ-0,5, рассчитанного по формуле (3). Как видно, по мере перехода от условий, близких к ПДС (в начале координат), к ПНС χ изменяется от 0,794 до 0,266.

Среднее по толщине образца значение χ определялось по формуле

$$\chi = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \chi(z) dz \quad (8)$$

и равно 0,68, где t_0 – толщина образца. После проведения аналогичных расчетов и усреднения χ для образца СТ-1 имеем $\chi = 0,8$.

Для определения жесткости напряженного состояния (σ_m/σ_i) с помощью той же КЭ-модели решалась трехмерная упругопластическая задача в геометрически нелинейной постановке, при этом начало пластического течения материала задавалось по Мизесу.

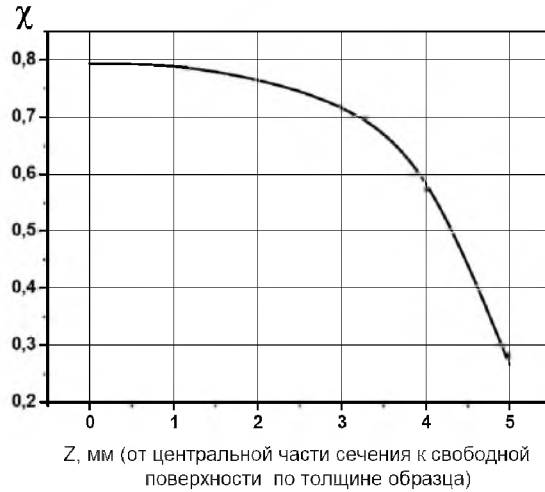


Рис. 5. Распределение параметра χ по толщине образца СТ-0,5.

Рис. 6 иллюстрирует распределение параметра σ_m/σ_i по толщине образца СТ-0,5 при температуре 400°C и смещении по линии действия силы, составляющем 0,14 мм. Расстояние от фронта трещины по оси OX (рис. 4) равно расстоянию, на котором реализуется максимальное напряжение по Мизесу у фронта трещины (рис. 7).

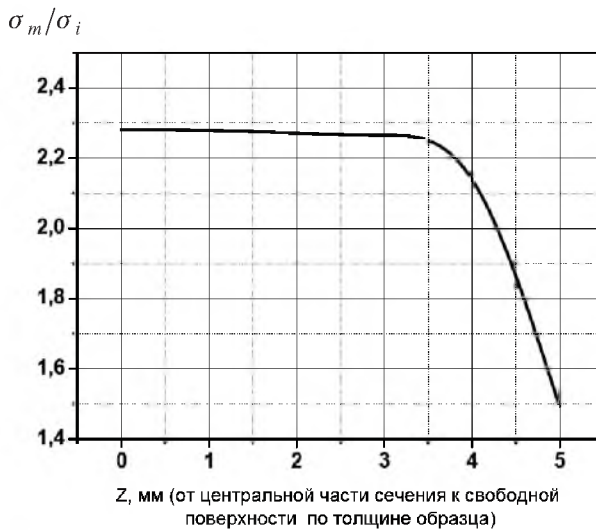


Рис. 6. Распределение σ_m/σ_i у фронта трещины по толщине образца СТ-0,5.

Параметр σ_m/σ_i , полученный в результате решения трехмерной упруго-пластической задачи усредняется по толщине образца аналогично параметру χ :

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_i} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \frac{\sigma_m}{\sigma_i}(z) dz. \quad (9)$$

Результаты обработки экспериментальных данных по разрушению цилиндрических образцов с различными концентраторами напряжений и диаграмм деформирования, а также численных расчетов по определению параметра χ приведены в табл. 2. Характеристическое расстояние X_c принято приближенно равным двум раскрытиям вершины трещины [1].

Т а б л и ц а 2

Данные для расчета по формулам (4), (5)

$T, ^\circ\text{C}$	C_f	k_f	ε_{1f}	n	A	$M_{f, \text{кН/мм}^2}$	χ
20	8159	18,3	0,193	0,061	1,29	9,35	$\frac{0,80}{0,67}$
300	383	13,7	0,238	0,123	1,562	11,32	$\frac{0,80}{0,67}$
400	79,25	10,4	0,197	0,21	2,18	15,8	$\frac{0,80}{0,67}$

Примечание. Над чертой приведены данные для образцов СТ-1, под чертой – для образцов СТ-0,5; значение ν составляло 0,3, $X_c = 0,0072$.

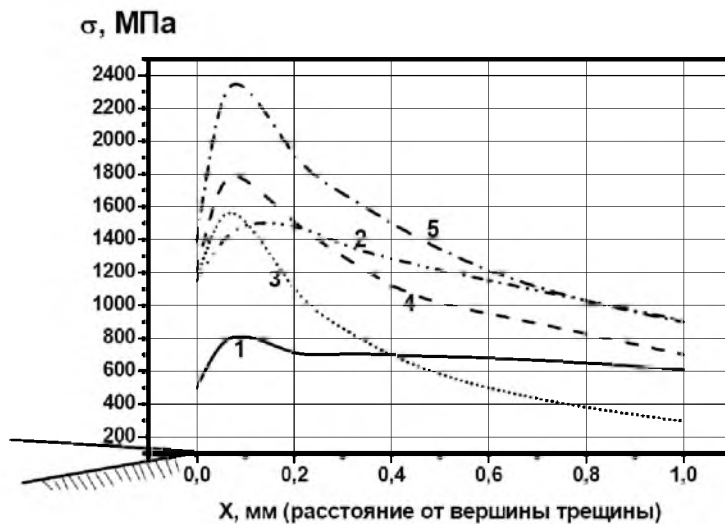


Рис. 7. Распределение напряжений у фронта трещины внутри образца: 1 – эквивалентное напряжение σ_i по Мизесу; 2 – σ_x ; 3 – σ_z ; 4 – гидростатическое напряжение σ_m ; 5 – σ_y .

На рис. 8 представлены данные сравнения характеристик трещиностойкости, полученных путем расчета по формулам (4) и (5) и экспериментально, для образцов СТ-1 и СТ-0,5 при различных температурах. Пересчет J_c на K_c осуществляется по формуле

$$K_c = \sqrt{J_c E'}, \tag{10}$$

где $E' = E$ – для плоского напряженного состояния; $E' = \frac{E}{1 - \nu^2}$ – для плоской деформации; E – модуль Юнга.

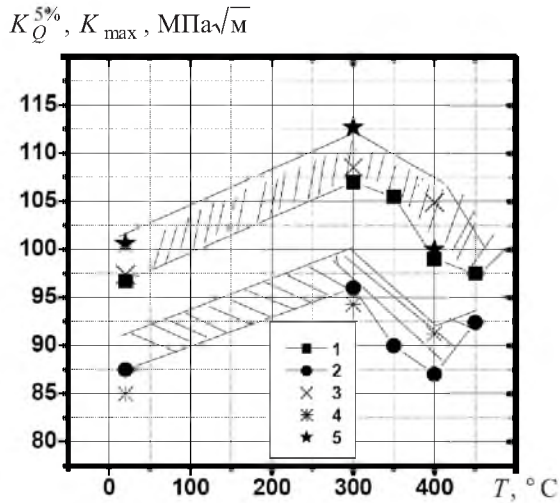


Рис. 8. Нижняя огибающая экспериментальных данных (■, ●) и расчетные (×, * – по (4), ★ – по (5)) результаты характеристик статической трещиностойкости: 1, 3, 5 – образец СТ-1; 2, 4 – образец СТ-0,5.

Как видно, характер температурной зависимости вязкости разрушения, рассчитанной по формуле (4), в целом соответствует характеру изменения экспериментально полученных критических характеристик трещиностойкости.

Данные прогноза по формуле (4) попадают в полосу разброса (рис. 8) экспериментальных данных по вязкости разрушения при температурах 300 и 400°C, при температуре 20°C прогнозируется консервативное значение вязкости разрушения, которое идет в запас трещиностойкости материала. В целом прогнозируется снижение критических характеристик трещиностойкости при уменьшении размера образца.

Заключение. На основании экспериментальных исследований стали 12Cr–2Ni–Mo показана возможность применения методики пересчета значений вязкости разрушения малых образцов СТ-0,5 на большие СТ-1 с учетом напряженно-деформированного состояния и толщины конструкционного элемента. Результаты прогноза попадают в полосу разброса экспериментальных данных.

Резюме

Досліджено вплив температури та розміру зразків на характеристики статичної тріщиностійкості жароміцної сталі 12Cr–2Ni–Mo. Показано, що в діапазоні температур 20...450°C збільшення товщини зразків призводить до незначного підвищення в'язкості руйнування, отриманої за 5%-ною січною у відповідності до стандартів щодо визначення характеристик тріщиностійкості. Розрахунок характеристик тріщиностійкості з урахуванням ефекту масштабу за розробленою раніше авторами розрахунково-експериментальною моделлю для сталі 12Cr–2Ni–Mo свідчить про задовільну відповідність експерименту у всьому дослідженому діапазоні температур.

1. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Каплуненко В. Г.* Прогнозирование трещиностойкости теплоустойчивых сталей с учетом размеров образцов. Сообщ. 2. Вязкое разрушение // Пробл. прочности. – 1997. – № 2. – С. 5 – 18.
2. *ГОСТ 25.506-85.* Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.
3. *ASTM E 1820.* Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness // Annual Book of ASTM Standards. – 1999. – Vol. 03. 01. – 48 p.
4. *Троценко В. Т., Покровский В. В., Каплуненко В. Г.* Прогнозирование трещиностойкости теплоустойчивых сталей с учетом размеров образцов. Сообщ. 1. Результаты экспериментальных исследований // Пробл. прочности. – 1997. – № 1. – С. 5 – 25.
5. *Бриджмен П.* Исследование больших пластических деформаций и разрыва. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 444 с.

Поступила 11. 07. 2008