

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°С 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 $K_{max}/K_Q^{5\%}$.

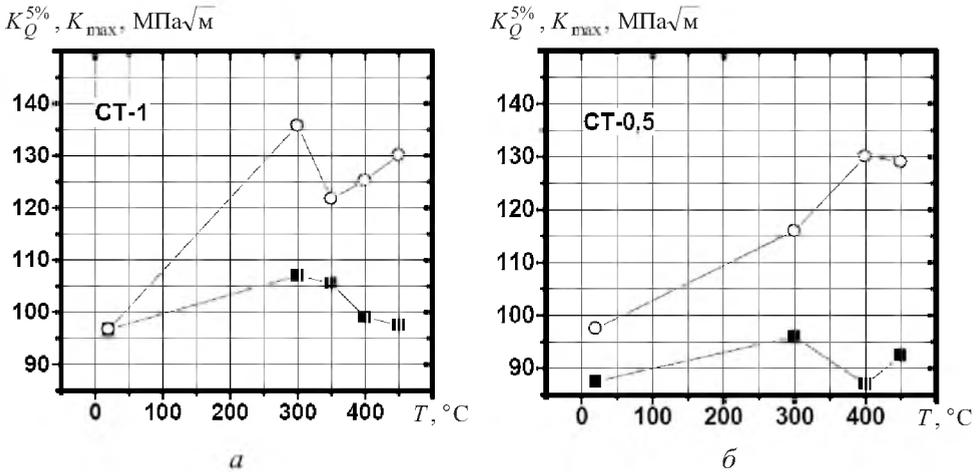


Рис. 1. Температурные зависимости статической трещиностойкости, полученные по 5%-ной секущей ($K_Q^{5\%}$) – темные точки и по нагрузке при разрушении (K_{max}) – светлые точки для образцов толщиной 25 (а) и 10 мм (б).

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).

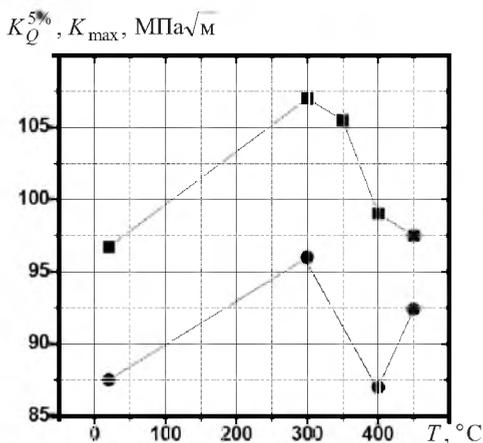


Рис. 2. Температурная зависимость характеристик статической трещиностойкости, полученная на компактных образцах СТ-1 толщиной 25 мм (■) и СТ-0,5 толщиной 10 мм (●).

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} .

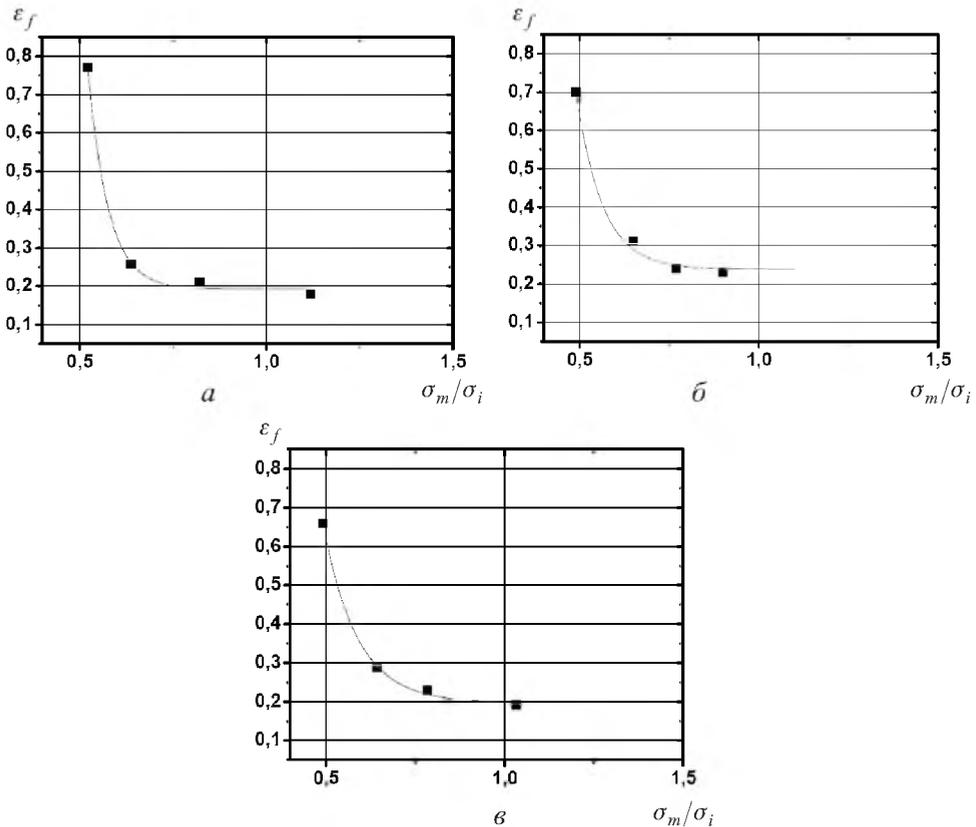


Рис. 3. Зависимость критической деформации от трехосности напряженного состояния при температуре 20 (а), 300 (б) и 400°С (в).

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.

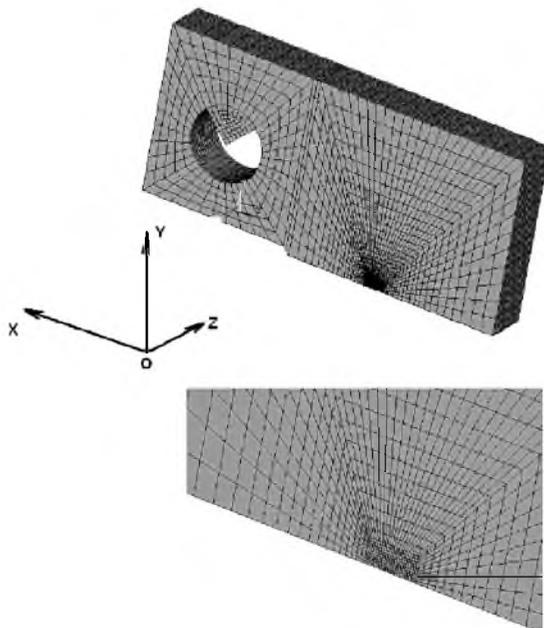


Рис. 4. Конечноэлементная модель образца СТ-0,5.

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.

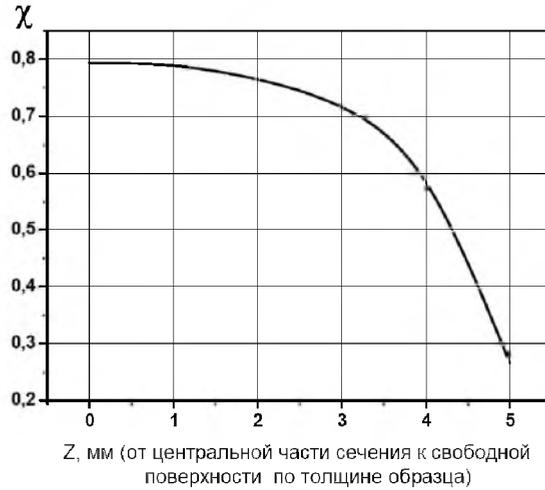


Рис. 5. Распределение параметра χ по толщине образца СТ-0,5.

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).

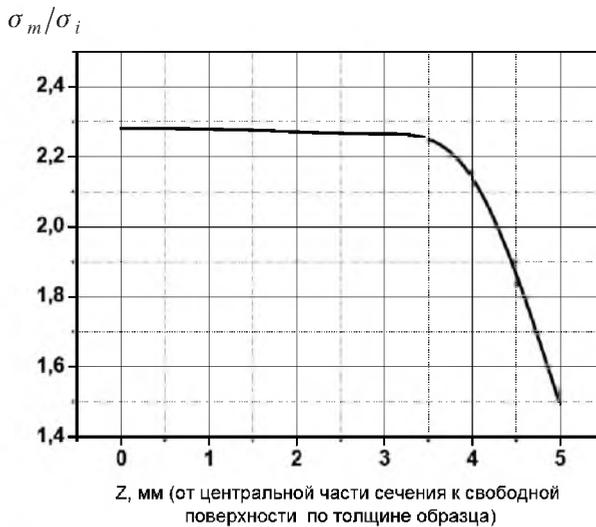


Рис. 6. Распределение σ_m/σ_i у фронта трещины по толщине образца СТ-0,5.

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, $X_c = 0,0072$.

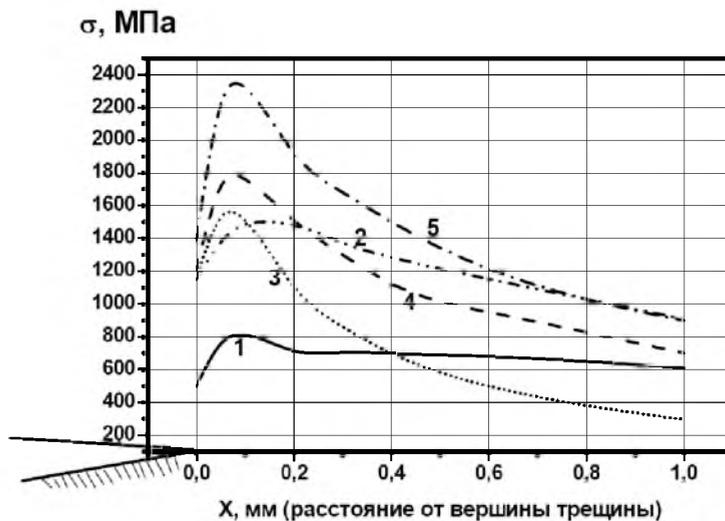


Рис. 7. Распределение напряжений у фронта трещины внутри образца: 1 – эквивалентное напряжение σ_i по Мизесу; 2 – σ_x ; 3 – σ_z ; 4 – гидростатическое напряжение σ_m ; 5 – σ_y .

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.

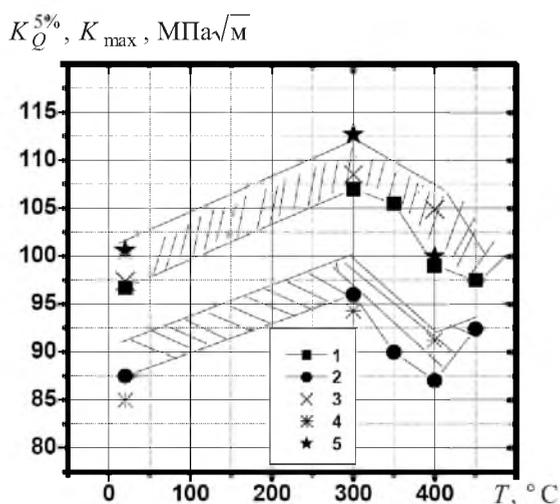


Рис. 8. Нижняя огибающая экспериментальных данных (■, ●) и расчетные (×, ✱ – по (4), ★ – по (5)) результаты характеристик статической трещиностойкости: 1, 3, 5 – образец СТ-1; 2, 4 – образец СТ-0,5.

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