



УДК 620.178:669.14  
ББК 22.251

## ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОНТАКТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Ю.С. Бахрачева

В работе рассмотрены теоретические зависимости между энергетическими параметрами в малой пластической зоне перед фронтом трещины и по глубине пластической зоны при вдавливании. Показано, что удельные энергии пластической деформации на единицу поверхности разрушения и по глубине пластической зоны пропорциональны.

**Ключевые слова:** хрупкое разрушение, фронт трещины, энергия пластической деформации, вязкость разрушения, сферический индентор.

Увеличение прочности, как правило, сопровождается снижением пластичности и вязкости разрушения. Это происходит потому, что у высокопрочных материалов мала энергия, поглощаемая при разрушении. Уровень этой энергии при хрупком разрушении определяется размером пластической зоны перед фронтом трещины (см. рис. 1). Если при внедрении индентора в поверхность контртела в зоне контакта возникает остаточная вмятина, то вокруг нее всегда имеется пластически деформированная область, распространяющаяся на некоторую глубину  $h_s$  (см. рис. 2). Эта область ограничена замкнутой поверхностью, на которой удовлетворяется условие пластичности Генки – Мизеса ( $\sigma_i = \sigma_T$ ). Наблюдаемое при повышении прочностных свойств, снижении температуры, увеличении скорости деформации уменьшение пластически деформированного объема (а значит, и работы пластической деформации) при испытании на твердость и вязкость разрушения есть следствие одного и того же явления – снижения подвижности дислокаций.

В работах [2–4] был предложен метод расчета удельной энергии пластической деформации  $\gamma_p$  в малой пластической зоне перед фронтом трещины. Показано существование зависимости между коэффициентом интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  и  $\sqrt{g_p}$  в широком интервале температур для сталей разных

уровней прочности. Если между энергетическими параметрами пластических зон при вершине трещины и при вдавливании сферического индентора будет установлена связь, то появится возможность прогнозирования сопротивления хрупкому разрушению по результатам контактного деформирования материалов.

Глубину распространения пластической зоны при вдавливании сферического индентора  $h_s$  находили по формуле:

$$h_s = \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T} - 1,2\left(\frac{d}{2}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $P$  – приложенная нагрузка;

$\sigma_T$  – предел текучести материала полупространства;

$d$  – значения диаметров полученных отпечатков.

Для построения обобщенной кривой течения  $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$  в пластической зоне под отпечатком вдоль оси вдавливания следует рассчитать текущие значения интенсивности напряжений в центре контакта  $\sigma_i$  при каждом значении нагрузки. В работе [5] величину интенсивности напряжений в центре контакта  $\sigma_i$  было предложено определять как

$$\sigma_i = \frac{1,5Ap_0\varepsilon_i}{3\varepsilon_i + \exp[-1,5\varepsilon_{i0} + C(z-R)]}, \quad (2)$$

где  $p_0$  – давление в центре контакта;

$\sigma_T$  – предел текучести материала полупространства;

$R$  – радиус индентора;  
 $\varepsilon_i$  – интенсивность упругопластической деформации.

Интенсивность упругопластической деформации определяется по формуле

$$\varepsilon_i = k \cdot h \cdot \exp(-k \cdot z), \quad (3)$$

где  $k$  – параметр, характеризующийся упругими свойствами материала;  
 $h$  – глубина отпечатка.

Давление в центре контакта рассчитывается как

$$p_0 = \left(1 + 0,5 \frac{a}{D}\right) HM, \quad (4)$$

где  $a$  – радиус площадки контакта;  
 HM – твердость по Мейеру.  
 Постоянные  $A$  и  $C$  определяются как

$$A = \frac{h_s^3}{\ln \frac{h_s + R}{R} \sqrt{(h_s^2 + a^2)^3}}, \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{h_s} \left[ -1,5\varepsilon_{i0} + \ln 3\varepsilon_T \left( \frac{Ap_0}{2\sigma_T} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

где  $h_s$  – глубина распространения пластической деформации;

$\varepsilon_T$  – деформация на пределе текучести [5].

Далее рассчитывали текущие значения энергии пластической деформации  $u_i$  для любой точки по глубине распространения пластической зоны при вдавливании вдоль оси  $z$  от 0 до  $h_s$ :

$$u_i = \frac{\sigma_T + \sigma_i}{2} \times \varepsilon_i, \quad (7)$$

где  $\sigma_i$  и  $\varepsilon_i$  – текущие значения интенсивности напряжений и деформаций вдоль оси  $z$  по глубине распространения пластической зоны при вдавливании, рассчитанные по известным зависимостям.

Интегрируя зависимость  $u_i(x)$  от 0 до  $h_s$ , по формуле (7) получаем значение удельной энергии пластической деформации по глубине пластической зоны при вдавливании сферического индентора:

$$u_p = \int_0^{h_s} u_i dx. \quad (8)$$

Объектом исследования служили стали 17ГС, 17ГС-У, 06Г2НАБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБ-У, 10ХГНМАЮ, применяющиеся для изготовления труб большого диаметра и корпусов атомных реакторов, свойства которых определяли в широком интервале температур. Механические испытания указанных сталей были выполнены в Институте проблем прочности НАН Украины [6]. Эксперименты по контактному деформированию проводили в Волгоградском государственном техническом университете [1]. Для исследования глубины распространения пластической зоны контактное деформирование проводили сферическим индентором диаметром  $D = 5$  мм при нагрузках  $P$  от 147 до 11 875 Н и температурах от 77 К до 293 К на приборах ТШ-2 (Бринелль) и ТК-2 (Роквелл).

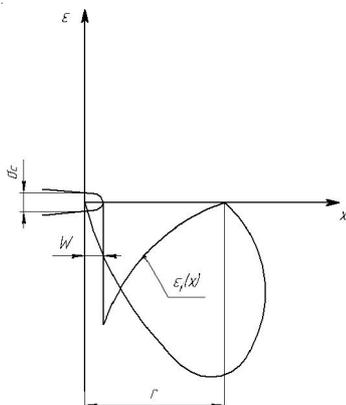


Рис. 1. Распределение деформации в малой пластической зоне перед фронтом трещины

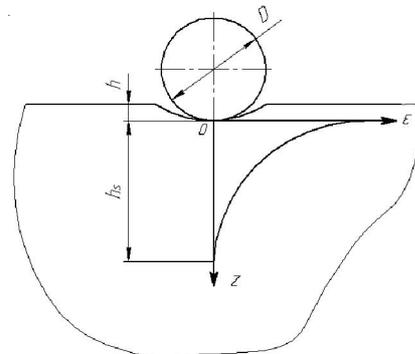


Рис. 2. Распределение деформации под остаточным отпечатком при внедрении сферы в плоскую поверхность упругопластического контртела

Сравнение значений  $r$  и  $h_s$  показало, что размер пластической зоны перед фронтом трещины более чувствителен к снижению температуры, чем при вдавливании индентора. Поэтому было предложено считать, что размеры пластических зон соответствуют друг другу при температуре 77 К нагрузке 150 Н, при температуре 213 К – 1 000 Н, при температуре 243 – 5 000 Н, при температуре 293 К – 11 800 Н.

Далее проводился расчет значений удельной энергии пластической деформации по глуби-

не пластической зоны при вдавливании сферического индентора  $u_p$ . Было показано, что энергетические параметры пластических зон при вершине трещины  $\gamma_p$  и при вдавливании сферического индентора  $u_p$  пропорциональны (рис. 3).

Зависимость между вязкостью разрушения  $K_{IC}$  и  $\sqrt{u_p}$  описывается прямой линией (рис. 4), которую можно аппроксимировать уравнением (9):

$$K_{IC} = 514,01 \sqrt{u_p} - 27,785. \quad (9)$$

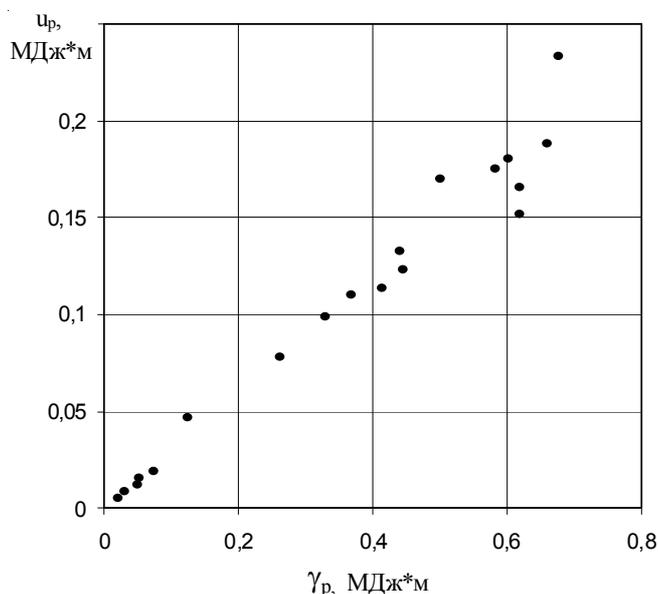


Рис. 3. Зависимость  $u_p$  и  $\gamma_p$

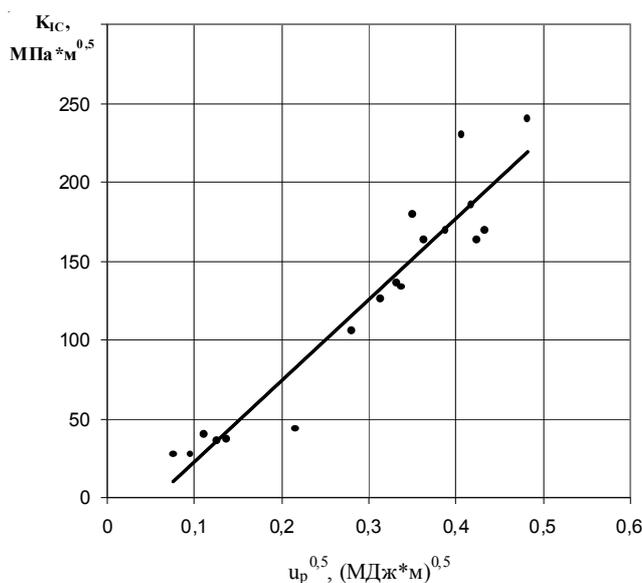


Рис. 4. Зависимость  $K_{IC}$  и  $\sqrt{u_p}$

Таким образом, появляется возможность прогнозирования сопротивления хрупкому разрушению по результатам контактного деформирования материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон, А. А. Оценка склонности сталей к хрупкому разрушению по величине критической энергии вдавливания / А. А. Барон, Ю. С. Бахрачева // *Металловедение и прочность материалов : межвуз. сб. науч. тр. ВолгГТУ. – Волгоград : Изд-во ВолгГТУ, 2005. – С. 82–89.*

2. Барон, А. А. Прогнозирование уровня трещиностойкости по величине удельной энергии пластической деформации / А. А. Барон, Ю. С. Бахрачева // *70 лет секции прочности и пластичности материалов им. Н.Н. Давиденкова : тез. докл. XIII Петерб. чтений по пробл. прочности, 12–14 марта 2002 г. / Физ.-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе РАН и др. – СПб. : Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та, 2002. – С. 39.*

3. Барон, А. А. Развитие модели для прогнозирования трещиностойкости материалов на основе критерия Гриффитса / А. А. Барон, Ю. С. Бахрачева // *Современные проблемы прочности : науч. тр. VI Междунар. симпоз. им. В.А. Лихачева, г. Старая Русса, 20–24 окт. 2003 г. / Новгор. гос. ун-т им. Ярослава Мудрого [и др.]. – Великий Новгород : Изд-во НовГУ, 2003. – Т. 2. – С. 178–182.*

4. Бахрачева, Ю. С. Оценка склонности сталей к хрупкому разрушению по результатам контактного деформирования / Ю. С. Бахрачева // *Прочность и разрушение материалов и конструкций : материалы V Междунар. науч. конф., 12–14 марта 2008 г. Оренбург, Россия / науч. ред. С. Н. Летуга, Г. В. Клевцов : Изд-во ГОУ ОГУ, 2008. – Т. 1. – С. 411–415.*

5. Дрозд, М. С. Аналитическое исследование напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упругопластическое полупространство / М. С. Дрозд, А. П. Осипенко // *Металловедение и прочность материалов : межвуз. сб. науч. тр. ВолгГТУ. – Волгоград : Изд-во ВПИ, 1975. – С. 12–19.*

6. Красовский, А. Я. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов / А. Я. Красовский, В. Н. Красико. – Киев : Наукова думка, 1990. – 176 с.

### FRACURE TOUGHNESS PREDICTION METHOD USING THE BALL INDENTATION TESTING

*Yu.S. Bakhracheva*

The subject considered is the theoretical dependences between parameters in a small scale yielding zone length, and a plastic zone at cave-in spherical indenter. A method for estimating the fracture toughness  $K_{Ic}$  through the results of ball indentation testing is suggested. The model proposed can be used for predicting the cracking resistance of metals in a wide temperature range.

**Key words:** *fragile destruction, crack front, energy of plastic deformation, viscosity of destruction, spherical indenter.*