

## **Влияние особенностей низкотемпературной пластической деформации металлов с ОЦК решеткой на напряженно-деформированное состояние в вершине макротрещины**

**С. А. Котречко, В. А. Попович**

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, Киев, Украина

*Приведены результаты использования предложенного ранее физического критерия текучести при сложном напряженном состоянии для описания пластической деформации в вершине трещины. Данный критерий, в отличие от критерия Мизеса, позволяет учитывать особенности пластической деформации ОЦК-металлов при низких температурах. Моделировалось нагружение образца в виде пластины (400×160 мм) с центральной трещиной при плоской деформации. Показано, что уменьшение сопротивления сдвигу под действием нормальных растягивающих напряжений, которое наблюдается при низкотемпературной пластической деформации ОЦК-металлов и сплавов, значительно влияет на параметры напряженно-деформированного состояния металла в вершине трещины. Это проявляется в увеличении размеров области локальной пластической деформации и максимальной пластической деформации в вершине трещины, изменении соотношения между касательными и нормальными напряжениями в пластической области. Обоснована целесообразность применения физического критерия текучести при расчетах методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния в вершине трещины в ОЦК-металлах и сплавах при низких температурах.*

**Ключевые слова:** пластическая деформация, макротрещина, компьютерное моделирование, локальная текучесть, напряженно-деформированное состояние.

**Введение.** Разрушение металлов и сплавов в условиях концентрации напряжений, создаваемых надрезами и острыми трещинами, всегда сопровождается локальной пластической деформацией. Это значит, что для определения локальных характеристик разрушения необходимо решать нелинейную краевую задачу, точность решения которой зависит от корректной формулировки условий пластической деформации металла при сложном напряженном состоянии. В настоящее время для этого используют критерий текучести Мизеса. Экспериментально установлено, что для металлов и сплавов с ОЦК решеткой критерий Мизеса выполняется только в области комнатной и высоких температур. При низких температурах наблюдается значительное отклонение экспериментальных данных от предельной кривой, рассчитанной по этому критерию [1]. Эта особенность низкотемпературной пластической деформации ОЦК-металлов и сплавов учитывается в обобщенном критерии Писаренко–Лебедева [1]. Физическая природа указанного эффекта изучалась в работе [2], где было показано, что такое отклонение вызвано спецификой низкотемпературного скольжения в ОЦК-металлах, суть которого заключается во влиянии нормальных напряжений на величину сопротивления сдвигу. На макроуровне это проявляется в зависимости напряжения текучести металла от величины шаровой компоненты тензора напряжений, т.е. от жесткости напряженного состояния.

В работе [1] рассматриваемый эффект исследовался при плоском напряженном состоянии, что не позволяло получить большие значения жесткости напряженного состояния. Известно, что величина жесткости возрастает при переходе от двухосного растяжения к трехосному, а наиболее простым способом создания трехосного растяжения являются надрезы. В связи с этим ранее [3] была разработана методика, с помощью которой можно исследовать особенности низкотемпературной текучести металла в условиях трехосного растяжения, создаваемого кольцевыми надрезами на цилиндрических образцах. На основе данных испытаний стальных цилиндрических образцов с кольцевыми надрезами радиусом 4 и 0,6 мм показано [3], что погрешность определения максимального растягивающего напряжения и интенсивности локальной пластической деформации с использованием критерия Мизеса может достигать примерно 14 и 40% соответственно в зависимости от температуры испытаний и радиуса надреза. Поскольку с понижением температуры испытаний и уменьшением радиуса надреза погрешность возрастает, представляет интерес оценить величину указанного эффекта для трещины, что позволяет создать максимально достижимые для надрезов значения жесткости напряженного состояния. В настоящей работе эта задача решалась путем сопоставления решений нелинейной краевой задачи для образца с трещиной методом конечных элементов (МКЭ) с использованием критерия Мизеса и предложенного ранее [3] критерия, который учитывает особенности низкотемпературной текучести металлов и сплавов с ОЦК решеткой.

**Методика компьютерного моделирования.** Критерий текучести, учитывающий особенности низкотемпературного скольжения в ОЦК решетке, может быть представлен следующим образом [3]:

$$\sigma_i = K_m \sigma_e, \quad (1)$$

где  $\sigma_e$  – напряжение текучести при одноосном растяжении;  $K_m$  – коэффициент, учитывающий эффект влияния нормальных напряжений на величину сопротивления сдвигу в зернах,

$$K_m = \frac{k_1(1 - P_c)\sqrt{2\pi(1 - r_i^2)} + \alpha k_2 \tau_c^0}{k_1(1 - P_c)\sqrt{2\pi(1 - r_m^2)} + \alpha k_2 \tau_c^0 J}; \quad (2)$$

$J$  – параметр, характеризующий жесткость напряженного состояния [1],

$$J = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}; \quad (3)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $r_i$  и  $r_m$  – коэффициенты корреляции касательных и нормальных микронапряжений в системах скольжения при одноосном и многоосном напряженном состоянии соответственно;  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициенты, зависящие от упругих постоянных решетки;  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий чувстви-

тельность сопротивления сдвигу к величине нормальных напряжений;  $\tau_c^0$  – напряжение сдвига при нулевой величине нормальных напряжений, действующих на плоскости скольжения;  $P_c$  – критическая доля активированных систем скольжения.

Необходимо подчеркнуть, что поскольку критерий (1) получен из “первых принципов”, т.е. исходя из статистического описания элементарных актов скольжения в поликристаллическом агрегате, состоящем из зерен с ОЦК решеткой, область его применимости ограничена металлами с таким типом решетки. В отличие от обобщенного критерия Писаренко–Лебедева [1], данный критерий не учитывает вид девиатора напряжений. Это означает, что для рассматриваемых металлов величина угла ориентации октаэдрического касательного напряжения по отношению к направлению главных нормальных напряжений не оказывает заметного влияния на условия текучести при сложном напряженном состоянии. В то же время для материалов, структура которых характеризуется значительной неоднородностью (чугуны, керамика, бетон, гипс и т.п.), эффектом влияния вида девиатора напряжений пренебрегать нельзя.

Для удобства расчетов коэффициент  $K_m$  целесообразно представить через макроскопические параметры [3]:

$$K_m = \frac{2}{1 + \chi + J(1 - \chi)}, \quad (4)$$

где

$$\chi = \frac{\sigma_Y^t}{\sigma_Y^c}, \quad (5)$$

$\sigma_Y^t, \sigma_Y^c$  – пределы текучести при растяжении и сжатии соответственно.

В выражении (4) особенность скольжения при низких температурах в сталях и сплавах с ОЦК решеткой характеризуется параметром  $\chi$ . Типичная зависимость величины этого параметра для мало- и среднеуглеродистых сталей приведена на рис. 1 [3].

Компьютерное моделирование проводилось с помощью программного комплекса для решения краевых задач методом конечных элементов. Расчеты выполнялись для трещины длиной 80 мм в пластине размером 400×160 мм. Моделировалось условие плоской деформации. Размер минимального конечного элемента в вершине макротрещины принимался равным 45 мкм, что сопоставимо с размером зерен в поликристаллическом металле. При расчетах использовались критерий Мизеса и предложенный критерий текучести (1). В последнем случае величина параметра  $\chi$  принималась равной 0,8. Такое значение характерно для малоуглеродистых сталей при температуре испытаний ~120 К.

Упругопластические задачи являются физически нелинейными, поскольку в пластической области связь между напряжениями и деформациями описывается нелинейной функцией. Решение физически нелинейной задачи осуществлялось итерационным методом переменных параметров упругости

[4, 5]. На  $n$ -й итерации новое приближение функции напряженно-деформированного состояния материала  $\psi$  вычислялось следующим образом\*:

$$\psi^{(n)} = p\psi^{(n-1)} + (1-p)\frac{\mu}{2} \quad \text{при} \quad \sigma_i^{(n)} < \Phi(\theta, K_m); \quad (6)$$

$$\psi^{(n)} = \psi^{(n-1)} \quad \text{при} \quad \sigma_i^{(n)} = \Phi(\theta, K_m); \quad (7)$$

$$\psi^{(n)} = \psi^{(n-1)} \left[ \frac{\sigma_i}{\Phi(\theta, K_m)} \right]^k \quad \text{при} \quad \sigma_i^{(n)} > \Phi(\theta, K_m), \quad (8)$$

где  $\mu$  – модуль сдвига;  $\Phi(\theta, K_m)$  – функция, описывающая поверхность текучести;  $\theta$  – параметр Одквиста, характеризующий величину накопленной деформации;  $p$  и  $k$  – параметры итерационного процесса:  $0 < p < 1$ ;  $1 < k < 2$ .

Итерационный процесс заканчивается при

$$\delta\psi \geq \left| \frac{\psi^{(n)}}{\psi^{(n-1)}} - 1 \right|, \quad (9)$$

где  $\delta\psi$  – заданная погрешность вычислений.

Погрешность вычислений для базового варианта пакета прикладных МКЭ-программ анализировалась в работе [5] с помощью стандартной процедуры сравнения аналитических и конечноэлементных решений. Для напряжений и деформаций она не превышала 2 и 5% соответственно.

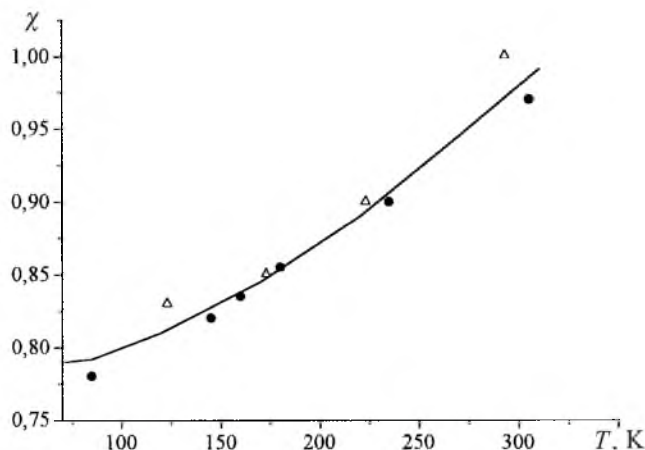


Рис. 1. Температурная зависимость параметра  $\chi$ . (Светлые точки – сталь 35, состояние поставки, нормализация [1]; темные – сталь 45, отжиг при  $T = 1250^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 2,5$  ч [3].)

\* В качестве базового использовался МКЭ-комплекс, разработанный в Санкт-Петербургском техническом университете [5].

**Обсуждение результатов расчетов.** Как следует из приведенных на рис. 2 данных, в условиях трехосного растяжения рассматриваемая особенность низкотемпературной текучести ОЦК-металлов оказывает существенное влияние на величину максимального растягивающего напряжения, интенсивность пластической деформации и жесткость напряженного состояния в пластической области у вершины трещины. При этом имеет место значительное (до 30%) уменьшение напряжения текучести в вершине трещины. Сопоставление результатов расчетов с использованием критерия текучести (1) и критерия Мизеса показывает, что в последнем случае погрешность увеличивается с ростом приложенной нагрузки (рис. 2). Так, при  $K_I/\sigma_{0,2} = 0,1477$  и  $\chi = 0,8$  погрешность использования критерия Мизеса при определении интенсивности напряжений составляет 45%, интенсивности пластических деформаций – 37%, коэффициента жесткости – 50%.

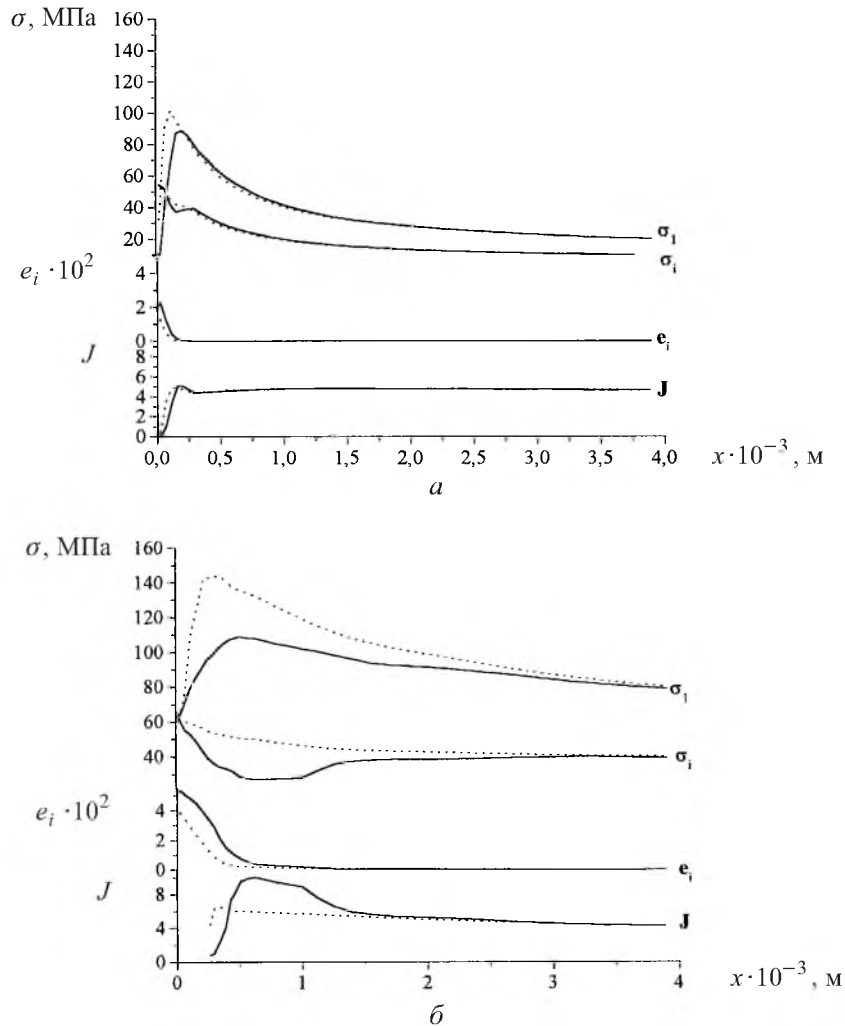


Рис. 2. Распределение напряжений и деформаций в вершине трещины при  $K_I/\sigma_{0,2} = 0,0594 \text{ м}^{1/2}$  (а) и  $K_I/\sigma_{0,2} = 0,1477 \text{ м}^{1/2}$  (б): сплошные линии – расчет по критерию (1), пунктирные – расчет по критерию Мизеса ( $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение).

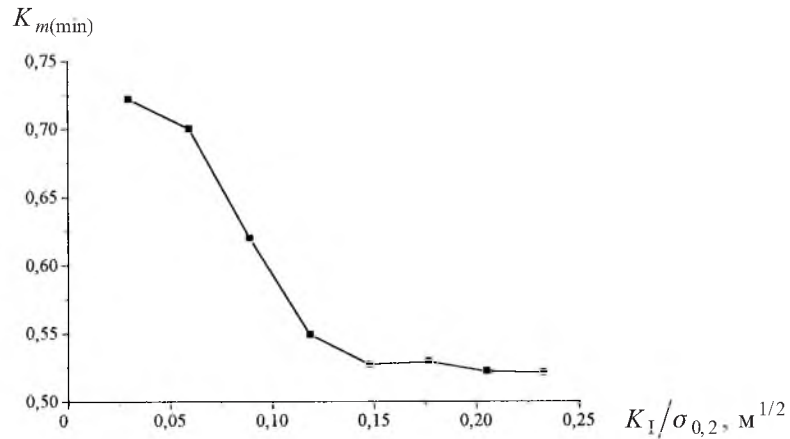


Рис. 3. Распределение значений коэффициента  $K_m$  в минимальном сечении образца с трещиной (расчет по критерию (1)).

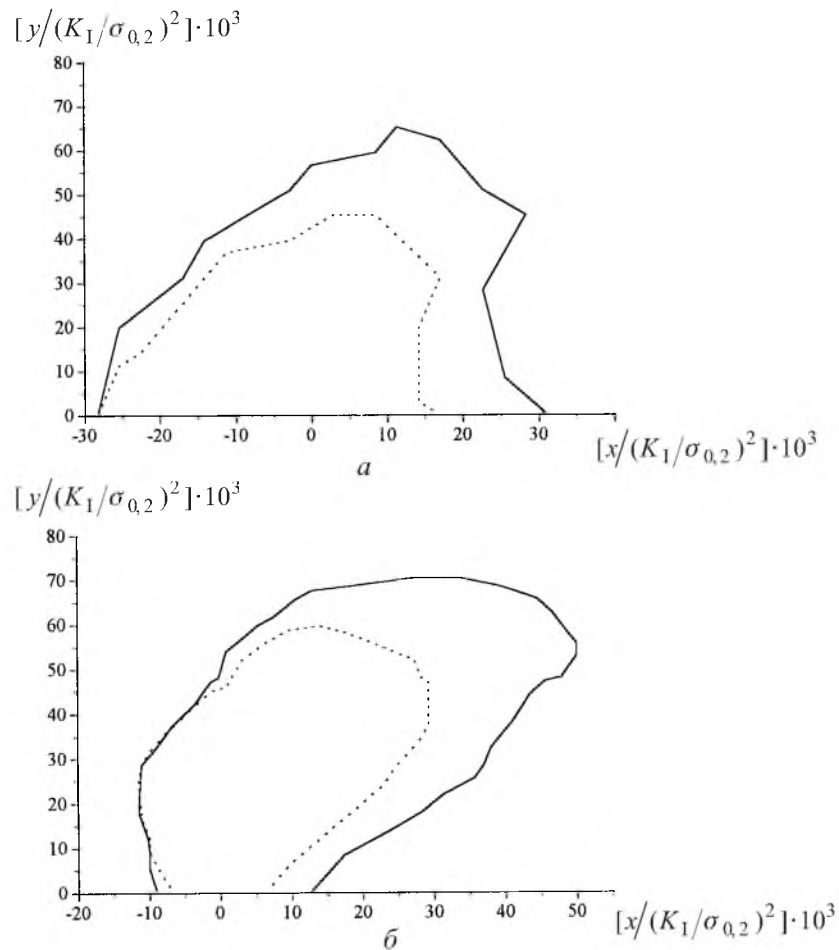


Рис. 4. Форма области локальной текучести в вершине трещины при  $K_I/\sigma_{0,2} = 0,0594 m^{1/2}$  (а) и  $K_I/\sigma_{0,2} = 0,1477 m^{1/2}$  (б): сплошные линии – расчет по критерию (1); пунктирные – расчет по критерию Мизеса, кривые соответствуют величине интенсивности пластической деформации  $\epsilon_p = 0,1\%$ .

Степень снижения напряжения течения определяется величиной коэффициента  $K_m$ . Согласно (4), величина  $K_m$  обратно пропорциональна значению жесткости напряженного состояния  $J$ . Поскольку величина  $J$  немонотонно изменяется в зависимости от расстояния от вершины трещины (рис. 2), параметр  $K_m$  также является функцией расстояния от вершины надреза и достигает минимального значения в области, где имеет место наибольшая жесткость напряженного состояния.

Расчеты показали, что при постоянной температуре ( $\chi = \text{const}$ ) минимальное значение параметра  $K_m$  уменьшается с ростом нагрузки (рис. 3). Согласно полученным данным при температуре порядка 120 К напряжение течения стали в вершине трещины может снижаться практически в два раза.

Рассматриваемый эффект оказывает влияние на размеры и форму локальной пластической области в вершине трещины (рис. 4). Из рис. 4 видно, что уменьшение напряжения течения под действием растягивающих напряжений в вершине трещины приводит к увеличению глубины области локальной пластической деформации. Кроме того, имеет место некоторое уменьшение угла между плоскостью трещины и направлением, соответствующим максимальной длине области пластической деформации. Это обусловлено смещением пластической зоны в область действия наибольших растягивающих напряжений.

## Выводы

1. Зависимость предела текучести от величины средних нормальных напряжений, которая наблюдается при низкотемпературной пластической деформации металлов с ОЦК решеткой, вызывает снижение напряжения течения ( $\sigma_i^T$ ) металла у вершины трещины, степень которого увеличивается с понижением температуры испытаний и ростом нагрузки на образец с трещиной.

2. Использование критерия Мизеса при расчете напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины в мало- и среднеуглеродистых сталях при температуре 120 К и ниже приводит к существенным погрешностям в определении максимального растягивающего напряжения ( $\delta \geq +25\%$ ), интенсивности локальных пластических деформаций ( $\delta \geq -40\%$ ) и жесткости напряженного состояния ( $\delta \geq -50\%$ ).

Авторы выражают благодарность акад. НАН Украины А. А. Лебедеву за интерес к работе и полезные замечания.

## Резюме

Наведено результати використання запропонованого раніше фізичного критерію текучості при складному напруженому стані для опису пластичної деформації у вістрі тріщини. Цей критерій, на відміну від критерію Мізеса, дозволяє врахувати особливості пластичної деформації ОЦК-металів за низьких температур. Моделювалось навантаження зразка у вигляді пластини (400×160 мм) з центральною тріщиною в умовах плоскої деформації.

Показано, що зменшення опору зсуву під дією нормальних розтягуючих напружень, що спостерігається при низькотемпературній пластичній деформації ОЦК-металів і сплавів, в значній мірі впливає на параметри напружено-деформованого стану металу у вістрі тріщини. Це проявляється в збільшенні розмірів області локальної пластичної деформації у вістрі тріщини, зміні співвідношення між дотичними і нормальними напруженнями в пластичній області. Обґрунтовано доцільність використання фізичного критерію текучості при розрахунках методом скінченних елементів напружено-деформованого стану у вістрі тріщини в ОЦК-металах і сплавах за низьких температур.

1. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 415 с.
2. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Рябошапка К. П., Стеценко Н. Н. Влияние особенностей скольжения в ОЦК-решетке на текучесть поликристалла // *Металлофизика*. – 1992. – **14**, № 4. – С. 84 – 94.
3. Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Меттус Г. С. Влияние объемного напряженного состояния на текучесть железа и углеродистых сталей. Сообщ. 2. Экспериментальное исследование низкотемпературной пластической деформации стали 45 в условиях трехосного растяжения // *Пробл. прочности*. – 1994. – № 11. – С. 8 – 13.
4. Биргер И. А. Метод упругих решений в теории пластического течения // *Изв. АН СССР. Сер. Механика и машиностроение*. – 1964. – № 1. – С. 9 – 17.
5. Гатовский К. М., Кархин В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений. Учеб. пособие. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1981. – 250 с.

Поступила 31. 01. 2002