

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

Томск
Издательский Дом ТГУ
2019

DOI: 10.17223/9785946218412/97

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ
ПЛАСТИЧНЫХ ТЕЛ С ТРЕЩИНАМИ**

Дерюгин Е.Е.

*Institute of Strength Physics and Materials Science, SB RAS, Russia, Tomsk
dee@ispms.tsc.ru*

В линейной механике разрушения хорошо разработан аппарат для определения критериев разрушения хрупких материалов. Однако до настоящего времени встречаются большие математические и вычислительные трудности, связанные с учетом влияния пластической деформации на поле напряжений для тел с трещинами [1, 2]. В данной работе предлагается новая модель трещины, учитывающая наличие зоны пластической деформации (ЗПД) вокруг трещины и ее влияние на поле напряжений в твердом теле. Модель позволяет проводить энергетический анализ характеристик разрушения пластичных тел с трещинами.

Трещина с момента зарождения и в процессе распространения всегда окружена слоем пластически деформированного материала. В работе приводится оригинальный метод построения ЗПД вокруг трещины. Модельная трещина представляет собой полость в плоскости в виде эллипса с полуосями a и b под действием внешнего напряжения растяжения σ , направленного вдоль малой полуоси b эллипса (рис. 1).

В целом модель представляет собой семейство вложенных друг в друга так называемых элементов релаксации (ЭР) в виде эллипсов (рис. 1). Контуры эллипсов расположены в слое толщиной h . Каждый ЭР в семействе является самостоятельным элементом эллиптической формы, связанным функционально с элементарной долей внешнего напряжения $d\sigma$ через переменную t : $d\sigma(t) = (\beta+1)\sigma^\beta dt$, где β – числовой параметр. Пластическая деформация внутри данного эллипса вызывает релаксацию внешнего напряжения. Релаксация напряжения $d\sigma(t)$ до нуля внутри эллипса обеспечивает однородное поле пластической деформации с компонентами

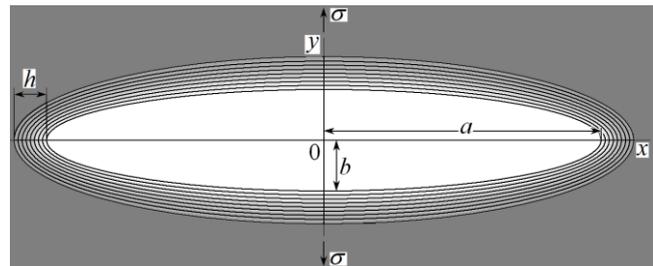


Рис. 1. Трещина в окружении пластически деформированного материала.

$$d\varepsilon_x(t) = -d\sigma(t)/E, \quad d\varepsilon_y(t) = d\sigma(1+2a(t)/b(t))/E, \quad d\varepsilon_{xy}(t) = 0, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга (рис. 1). Длины полуосей равны соответственно $a(t) = a + h(1 - t)$, $b(t) = b + h(1 - t)$. Переменная t изменяется в пределах от 0 до 1, a и b – большая и малая полуоси трещины (рис. 1). Согласно принятому определению, значение $t = 0$ соответствует эллипсу, охватывающему ЗПД. Увеличение t соответствует последовательному переходу от внешней границы ЗПД к свободной поверхности трещины. Конкретное значение t выбирает определённый контур семейства. Точка на оси x соответствует контуру ЭР со значением $t = 1 - (x-a)/h$.

На основе известных свойств эллиптического выреза [3, 4], с учетом зависимостей (1), получено уравнение энергии образования трещины длиной $l = 2a$:

$$U = \frac{\pi\sigma^2}{2E} \left[2a^2 + \frac{h(5a+b)}{\beta+2} + \frac{6h^2}{(\beta+3)(\beta+2)} + ba \right]. \quad (2)$$

Уравнение (2) позволяет определять критерии разрушения для пластичных тел в зависимости от геометрических параметров модели (a , b , h) и параметра β , определяющего характер распределения пластической деформации в ЗПД. Далее, для общности, малую полуось эллипса выражали через радиус кривизны эллипса на конце большой полуоси: $b = \sqrt{ra}$.

Секция 2. Неустойчивость и локализация деформации и разрушения в материалах с иерархической структурой

На рис. 2 приведена зависимость энергии образования трещины U от ее полудлины a для шести размеров ЗПД h , определяемых последовательностью $h_i = 0.2i$ mm ($i = 0 \dots 5$). Видно, что энергия U монотонно растет в процессе распространения трещины. Формирование ЗПД вокруг трещины требует дополнительной работы внешних приложенных сил.

Изменение потенциальной энергии пластины единичной толщины, связанное с распространением трещины на расстояние $dl = 2da$, равно

$$G = \frac{dU}{2da} = \frac{\pi\sigma^2}{4E} \left[4a + \sqrt{ra} + \frac{5h}{\beta + 2} \right]. \quad (3)$$

В механике разрушения G является энергетической характеристикой разрушения и называется «скоростью высвобождения упругой энергии» при распространении трещины [1]. Из уравнения (3) следует, что в общем случае пластическая деформация увеличивает трещиностойкость материала: чем больше зона пластической деформации h и меньше значение параметра β тем выше значение G . Анализ уравнения (2) позволил сформулировать общую закономерность: чем меньше градиент пластической деформации перед вершиной трещины, тем выше трещиностойкость материала.

При отсутствии ЗПД вокруг трещины из (3), получим следующее выражение для G :

$$G_{h=0} = \frac{\pi\sigma^2}{4E} [4a + \sqrt{ra}]. \quad (4)$$

Из него следует, что чем больше радиус кривизны трещины, тем трещиностойкость материала выше. Если $r \rightarrow 0$, то в пределе из уравнения (4) получим известное выражение для скорости высвобождения упругой энергии трещины Гриффитса [1, 2]: $G_{h=0} = \pi\sigma^2 a / E$.

Основной характеристикой трещиностойкости хрупких материалов с трещиной отрыва является функция $K_I = \sqrt{GE} = \sigma\sqrt{\pi a}$, которая в механике разрушения носит название коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Подобную характеристику можно сформулировать и для пластичных материалов, подставив под корень выражение (3) для G :

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \left[a + \sqrt{ra} / 4 + 5h / (4\beta + 8) \right]}. \quad (4)$$

Характеристика K_I является более универсальной по сравнению с G , поскольку не зависит от модуля Юнга материала. По определению, K_I является силовой характеристикой разрушения твердого тела.

Использование уравнений (2) и (3) позволяет анализировать критерии разрушения малоразмерных образцов пластичных материалов, когда размеры ЗПД соизмеримы с размером трещины.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление исследований П.23, и поддержана Российским Фондом Фундаментальных исследований, проект № 17-08-00377.

1. Anderson T.L. Fracture mechanics. Fundamentals and Applications. Third Edition. (2005) Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW. <http://www.taylorandfrancis.com>
2. Broek D. Elementary engineering fracture mechanics (1974) Leiden.
3. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems // Proc. Roy. Soc. Lond. 241A (1957) 376-396.
4. Markenscoff X. Cracks as Limits of Eshelby Inclusions // Physical Mesomechanics 22 No 1 (2019) 42–45.

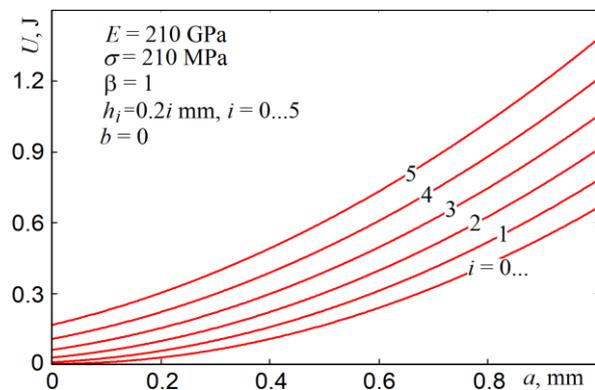


Рис. 2. Зависимость энергии образования U от длины трещины для разных значений h .