

УДК 539.3

ДЕФОРМАЦИОННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛ

© 2011 г.

А.И. Хромов¹, А.А. Буханько¹, Е.П. Кочеров²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева

²ОАО «Кузнецов», Самара

khromov@ssau.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Анализ процессов хрупкого и упругопластического разрушения в нелинейной постановке строится, как правило, на основе инвариантного J -интеграла и δ_k -теории и представляет взгляд на пластическую область в окрестности вершины трещины со стороны, по существу, нелинейно упругой части тела. Он не учитывает основной параметр, отличающий теорию упругости от теории пластичности – диссипацию механической работы внутренних сил. Этот параметр существенно влияет на зарождение трещины и, по-видимому, определяет скорость и направление ее развития. Для устранения этого недостатка предлагается альтернативный взгляд на окрестность зоны локализации пластических деформаций с точки зрения теории пластичности (упрочняющегося жесткопластического тела и, в частности, идеального жесткопластического тела). Подход позволяет аналитически оценить диссипативные процессы, приводящие к зарождению трещины и ее распространению.

Ключевые слова: деформация, пластичность, разрушение.

Формулировка условия разрушения

Цель рассматриваемого подхода – формулировка условий разрушения, учитывающих повреждаемость материала вследствие диссипации механической работы внутренних сил, которая считается основной характеристикой истории деформирования материала. Показано, что вид этих условий существенно зависит от вида условия пластичности и наиболее простая формулировка критериев разрушения получается при условии пластичности, связанном с поверхностью Σ деформационных состояний несжимаемого жесткопластического тела, точнее с линиями пересечения этой поверхности с плоскостями, параллельными девиаторной плоскости [1].

За меру деформации принимается тензор конечных деформаций Альманси \mathbf{E} , за параметр упрочнения принимается его первый инвариант $h = E_1 + E_2 + E_3$, который может быть заменен энергетическим параметром, связанным с накопленной удельной диссипацией энергии W в процессе деформирования.

Процесс разрушения понимается как процесс зарождения макротрещины и процесс дальнейшего ее распространения. В связи с этим вводятся две механические характеристики разрушения: W_{**} и W_* , определяющие соответственно момент зарождения макротрещины и скорость ее распространения. Константа W_{**} определяет положение

критической линии на поверхности Σ , при пересечении которой происходит зарождение макротрещины.

Экспериментальное определение констант разрушения

Определение констант W_{**} и W_* производится на основе одноосного растяжения цилиндрических образцов по диаграмме σ – ϵ и величин δ , ψ , соответствующих относительному удлинению и относительному сужению образца при разрушении [2]. Показано, что для определения этих констант требуется знание всех размеров образца, включая измерение промежуточного диаметра образца непосредственно перед образованием шейки.

Предполагается, что при одноразовом деформировании нового образца предельная линия на поверхности Σ соответствует максимально возможному упрочнению материала, то есть соответствует пределу прочности σ_B . Предполагается также, что, начиная с некоторого момента, предварительное деформирование материала (например, циклическое растяжение-сжатие образца без разрушения) приводит к снижению величины σ_B , то есть уменьшает способность материала к упрочнению. Поэтому величины W_{**} , W_* являются функциями накопленной удельной диссипации энергии W_N в каждой частице.

Распространение трещины в упругопластическом теле

Обобщение рассматриваемого подхода на процесс распространения трещины в упругопластическом теле проводится следующим образом: распространение трещины в упругом теле рассматривается как движение углового выреза вместе с небольшой жесткопластической областью (рис. 1) [3, 4].

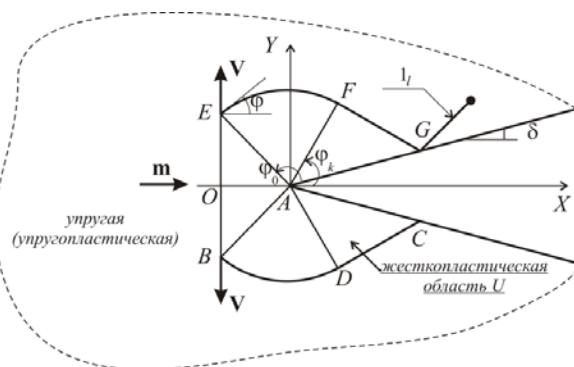


Рис. 1

Это обобщение позволяет связать значение инвариантного контурного J -интеграла с константой W_* :

$$\frac{j}{2W_* \cdot l_l} = \frac{\sqrt{2} \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} (\partial v / \partial \varphi + u) d\varphi}{m \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} (\partial v / \partial \varphi + u) d\varphi / u}$$

где

$$u = V(\sin \varphi - \sqrt{2}) - Vm \cos \varphi, \\ v = V \cos \varphi + Vm \sin \varphi,$$

$$m = -\operatorname{ctg} \frac{\delta}{2}, \quad \varphi_0 = \frac{\pi}{4}, \quad \varphi_k = -\frac{\pi}{4} + \delta.$$

В предположении, что пластическая область мала (ее размеры стремятся к нулю), распределение нормальных скоростей будет стремиться к полю скоростей в задаче о растяжении жесткопластической полосы с V-образным вырезом [3, 5], а невязка касательных скоростей, связанная с приближенным «склеиванием» упругой и жесткопластической областей, будет стремиться к нулю. Тогда отношение $J/(2W_*)$ оценивается выражением $J/(2W_*) = -0.782\delta + 1.259$ с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0.999$.

Влияние предварительного деформирования (истории деформирования) учитывается с помощью экспериментально определяемых зависимостей $W_{**}(W_N)$, $W_*(W_N)$.

Список литературы

1. Буханько А.А., Григорьева А.Л., Кочеров Е.П., Хромов А.И. Деформационно-энергетический критерий разрушения жесткопластических тел // Изв. РАН. МТТ. 2009. №6. С. 177–184.
2. Хромов А.И., Буханько А.А., Козлова О.В., Степанов С.Л. Пластические константы разрушения // ПМТФ. 2006. Т. 47, №2. С. 147–155.
3. Хромов А.И., Буханько А.А., Степанов С.Л. Концентраторы деформаций // Докл. РАН. 2006. Т. 407, №6. С. 777–781.
4. Райс Дж. Математические методы в механике разрушения: В кн. Разрушение. Т. 2 / Под ред. Г. Либовиц. М.: Мир, 1975. С. 204–335.
5. Richmond O. Plane strain necking of V-notched and un-notched tensile bars // J. Mech. and Phys. Solids. 1969. V. 17. P. 83–90.

STRAIN-ENERGY APPROACH TO A DESCRIPTION OF FRACTURE PROCESSES OF PLASTIC BODIES

A.I. Khromov, A.A. Bukhanko, E.P. Kotcherov

Analysis of processes of brittle and elastic-plastic fracture boils down to the theory of nonlinear elastic body and is based on J -integral and δ_k -theory (crack opening displacement) in statement. It ignores the key parameter that distinguishes the theory of elasticity from the theory of plasticity. It is the dissipation of mechanical work of internal forces. This parameter substantially influences crack initiation and propagation. The alternative approach is suggested for the analysis of the vicinity of the localization zone of plastic strains on the basis of plasticity theory. This approach allows estimating dissipative processes that result in the crack initiation and propagation.

Keywords: strain, plasticity, fracture.