

УДК 539.3

## МОДЕЛЬ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2011 г.

*М.Н. Кривошеина<sup>1</sup>, С.В. Кобенко<sup>2</sup>, Е.В. Туч<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

<sup>2</sup>Нижевартовский государственный гуманитарный университет

<sup>3</sup>Томский госуниверситет

Marina\_nkr@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Моделируется упругопластическое деформирование и разрушение анизотропных металлов и сплавов в волнах сжатия и растяжения с учетом кинетики процесса разрушения. Предложена модель, с помощью которой можно учесть основные особенности процесса нагружения анизотропных металлов и сплавов при динамических нагрузках. Она позволяет моделировать особенности разрушения от сдвига и изменения объемов несплошностей с учетом релаксации напряжений и изменения характеристик материала вследствие появления и роста большого количества несплошностей. Зарождение магистральной трещины моделируется в результате слияния пор, что возможно при достижении высокой их концентрации. Численно в трехмерной постановке проведены исследования разрушения преграды при ее ударном нагружении с применением критериев разрушения, описывающих сдвиговое и откольное разрушение анизотропных материалов.

*Ключевые слова:* численное моделирование, анизотропия, упругость, пластичность, динамическое нагружение, разрушение.

### Введение

В результате формирования в металлах и сплавах возникает анизотропия различных механических свойств: упругих, пластических, прочностных. Как правило, наибольшей анизотропией обладают ударная вязкость, относительное удлинение и относительное сужение при разрыве. Ударное нагружение преград вызывает их сложное напряженное состояние. Особенностью условий динамического нагружения преград является одновременное проявление нескольких видов разрушения ударников и преград по существенно различающимся механизмам. При математическом моделировании динамического нагружения элементов конструкций, выполненных из анизотропных металлических материалов, необходимо исследовать вклад анизотропии упругих и пластических свойств в итоговую картину деформирования и разрушения таких материалов. Цель работы – исследование влияния анизотропии упругих и пластических свойств на разрушение материалов преград.

### Математическая постановка

Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатные движения сжимаемой анизотропной среды включает в себя уравнение не-

разрывности, уравнения движения сплошной среды, уравнение энергии. Упругая деформация определяется с помощью обобщенного закона Гука, пластическая деформация определяется согласно теории течения. Применено условие пластичности, позволяющее моделировать изотропное и кинематическое упрочнение начально анизотропного материала [1].

Поскольку у металлов и сплавов степень анизотропии упругих и пластических свойств невелика, предполагается, что шаровые и девиаторные части тензоров напряжений и деформаций соответствуют друг другу. Это означает, что возникшими деформациями сдвига при приложении гидростатического напряжения к телу сферической формы можно пренебречь. В качестве критерия разрушения от сдвига начально анизотропного материала преграды используется критерий разрушения Мизеса – Хилла:

$$A(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + B(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + C(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + D\tau_{12}^2 + E\tau_{13}^2 + F\tau_{23}^2 = 1,$$

где  $\sigma_{ij}$  – компоненты симметричного тензора напряжений;  $A, B, C$  – характеристики материала, определяемые с помощью пределов текучести при растяжении по главным осям анизотропии;  $D, E, F$  определяются с помощью пределов текучести при сдвиге. В областях, где критерий разрушения выполняется при сжатии, считается, что матери-

ал теряет свойства анизотропии и ведет себя как жидкость, при этом  $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ),  $P$  – давление,  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера. В областях, где критерий разрушения выполняется при растяжении, компоненты тензора напряжений полагаются равными нулю.

Откольное разрушение материала преграды рассматривается как процесс слияния микропор в пластически деформированном материале под действием растягивающих напряжений. Суммарное влияние наличия микропор на напряженное состояние материала заключается в уменьшении механических характеристик из-за уменьшения эффективной площади поперечного сечения в пористом материале, через которую передается нагрузка. В качестве базовой модели «вязкого» разрушения анизотропных материалов используется модель Кэрролла–Холта [2], ранее применявшаяся для изотропных сред, но с изменениями, учитывающими анизотропию упругих и пластических свойств материала. В качестве меры поврежденности используется параметр пористости, введенный Херрманом, – отношение удельного объема пористой среды ( $V = V_m + V_p$ ) к удельному объему сплошного материала матрицы (начально анизотропного материала):  $\alpha = V/V_m$ . Изменение пористости материала со временем находится из условия равенства приращения давления, полученного с помощью уравнения состояния Ми–Грюнайзена и за счет роста пор [3]. После нахождения параметра пористости находится плотность и давление в пористом анизотропном материале:  $\rho = \rho_m/\alpha$ ,  $P = P_m(\alpha, \rho, \epsilon)/\alpha$ , где  $\epsilon$  – удельная внутренняя энергия,  $P_m$  и  $\rho_m$  – давление и плотность сплошного материала. Изменение значений технических упругих постоянных ( $D_{ij0}$ ) и пластических характеристик в пористом анизотропном материале  $\sigma_{ijT0}$  происходит в соответствии с изменениями пористости среды:

$$D_{ij} = D_{ij0} \left( 1 - \frac{\alpha - \alpha_{00}}{\alpha_k - \alpha_{00}} \right);$$

$$\sigma_{ijT} = \sigma_{ijT0} \left( 1 - \frac{\alpha - \alpha_{00}}{\alpha_k - \alpha_{00}} \right),$$

где  $\alpha_{00}$  – начальная пористость материала,  $\alpha_k$  – конечная пористость.

При достижении в элементе материала кри-

тической пористости  $\alpha_k$  происходит нарушение сплошности материала и напряжения в нем принимаются равными нулю:  $\sigma_{ij} = 0$ . Для корректировки напряжений используется производная Яуманна.

Численно в трехмерной постановке проведены исследования разрушения преграды из анизотропного материала при ее ударном нагружении деформируемыми ударниками с применением критериев разрушения, описывающих сдвиговое и откольное разрушение анизотропных материалов. Для моделирования деформирования материалов преграды и ударника использовались уравнения механики сплошной среды. Деформирование стального изотропного ударника описывалось с помощью модели упругопластического течения Прантля–Рейсса. На контактной поверхности ударника и преграды реализовано условие скольжения без трения. Расчеты проведены с использованием оригинальных программ. В качестве численного метода использовался метод конечных элементов, модифицированный Г.Р. Джонсоном для задач удара.

Проведены исследования влияния анизотропии характеристик упругости и пластичности анизотропного материала преграды на его разрушение.

### Вывод

Для металлов и сплавов, имеющих невысокую степень анизотропии упругих и пластических свойств, представлена модель, позволяющая описывать их упругопластическое деформирование и разрушение в волнах сжатия и растяжения.

*Работа выполнена по проекту 3.20.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, проекту 12.4 программы Президиума РАН.*

### Список литературы

1. Косарчук В.В., Ковальчук Б.И., Мельников С.А. Экспериментальная проверка определяющих соотношений теории пластического течения анизотропных сред // Пробл. прочности. 1991. №11. С. 19–25.
2. Carroll M.M., Holt A.C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, No 4. P. 1626–1635.
3. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие явления. Northampton; Томск: STT, 2005. 356 с.

**THE MODEL OF THE ELASTOPLASTIC DEFORMATION AND SPLITTING DESTRUCTION  
OF ANISOTROPIC MATERIALS**

*M.N. Krivosheina, S.V. Kobenko, E.V. Tuch*

Elastoplastic straining and fracture of anisotropic metals and alloys in compression and tensile waves are modeled, accounting for kinetics of the fracture process. The model enables to account for the main properties of the fracture process and volumetric changes of discontinuity flaws with a due account for the stress relaxation and changes of properties of the material arising as a result of the increase in discontinuity flaws. The generation of the main crack is modeled as a result of void coalescence, which is possible when they reach high concentration levels. A three-dimensional formulation of fracture of an obstacle made of an anisotropic material under impact loading with deformable strikers is numerically studied, using fracture criteria which describe shear and spallation fracture of anisotropic materials. The calculations have been done using original programs employing the finite-element method.

*Keywords:* numerical simulation, anisotropy, elasticity, plasticity, dynamic loading, failure.