

*М. Н. Кривошеина, Е. В. Туч, И. Ю. Коньшева, М. А. Козлова***Моделирование кратерообразования
в анизотропных преградах***M. N. Krivosheina, E. V. Tuch, I. U. Konisheva, M. A. Kozlova***Cratering Simulation on Anisotropic Targets**

В зависимости от кинематических и геометрических параметров нагружения преград их разрушение может происходить в результате кратерообразования, выбивания пробки, формирования откольной тарелочки и т. д. Для моделирования различных видов разрушения необходимо использовать различные критерии разрушения. Упругое деформирование анизотропного материала описывается обобщенным законом Гука, пластическая деформация определяется с помощью ассоциированного закона течения. В качестве условия пластичности для анизотропных материалов используется условие Мизеса-Хилла с учетом изотропного упрочнения. Проведено численное моделирование разрушения преграды из транстропного алюминиевого сплава Д16Т при ее нагружении цилиндрическими стальными ударниками. Расчеты проведены в трехмерной постановке в рамках механики сплошной среды. Учитывалась анизотропия упругих, пластических и прочностных свойств материала преграды. Расчеты проводились методом конечных элементов с использованием оригинальных программ. Показано, что в преградах, выполненных из анизотропных материалов, напряженно-деформированное состояние материала преграды под ударником имеет эллипсоидальную форму при нормальном нагружении осесимметричными ударниками из изотропных материалов.

Ключевые слова: численное моделирование, упруго-пластическое деформирование среды, откольное разрушение.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-15

Упругопластическое деформирование и разрушение анизотропных материалов проведено с помощью следующей модели. Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатные движения сжимаемой анизотропной среды, включает в себя [1, с. 309] уравнение неразрывности, уравнения движения сплошной среды, уравнение энергии.

Введем допущения: полная деформация представляема в виде суммы упругой и пластической деформаций, пластическое течение материала не зависит от гидростатического давления (такое допущение возможно для материалов, имеющих невысокую степень ани-

According to kinematic and geometric parameters of target stress loading, target destruction can be caused by cratering, spalling, etc. Simulation of various types of deformation should incorporate various deformation criteria. Elastic deformation of anisotropic material is described by the generalized Hooke's law while plastic deformation is defined by the associated flow law. Mises-Hill condition with isotropic hardening is used as a condition of anisotropic material plasticity. In the paper, destruction of targets made of aluminum alloy 2024 by cylindrical steel projectiles is numerically simulated. Calculations are performed by finite element method in a three-dimensional setting within the continuum mechanics framework. Anisotropy of elastic, plastic, and strength properties of the target material is taken into account. Original software is used for calculations. It is demonstrated that stress-strain state of targets made of anisotropic materials has an ellipsoidal shape, when target stress loading is normal and axially symmetric projectiles are made of isotropic materials.

Key words: numerical modeling, elastoplastic deformation of the medium, spall fracture.

тропии упругих и пластических свойств), упругие свойства материала не изменяются при пластическом деформировании. Полные напряжения представлены в виде суммы шаровой и девиаторной частей. Предполагалось, что шаровая часть тензора напряжений соответствовала шаровой части тензора деформаций.

Упругое деформирование анизотропного материала описывается обобщенным законом Гука, пластическая деформация определяется с помощью ассоциированного закона течения. В качестве условия пластичности для анизотропных материалов используется условие Мизеса-Хилла с учетом изотропного

упрочнения [2, с. 111]. Для конструкционных анизотропных сплавов в условиях статического нагружения функция изотропного упрочнения (R) инвариантна к виду напряженного состояния [3, с. 50; 4, с. 3]. Эта функция может быть определена из опытов на простое нагружение и линейно зависит от величины накопленной пластической деформации ψ :

$$R(\psi) = 1 + \xi\psi, \psi = \int (d\epsilon_p^p d\epsilon_j^p)^{\frac{1}{2}};$$

для алюминиевого сплава Д16Т $\xi = 5,5$.

Разрушение анизотропного материала преграды в волнах растяжения и сжатия моделируется при выполнении критерия разрушения Мизеса-Хилла. Если критерий разрушения выполняется в условиях сжатия, то материал теряет анизотропные свойства и сохраняет прочность только при сжатии, компоненты тензора напряжений определяются его шаровой частью. Если критерий разрушения нарушается в условиях растяжения, то материал считается полностью разрушенным и компоненты тензора напряжений полагаются равными нулю. Напряжения, определенные в элементе, жестко повернутом в пространстве, пересчитываются с помощью производной Яуманна [5, с. 52; 6, с. 353]. В качестве уравнения состояния использовалось уравнение Ми-Грюнайзена [7, с. 95].

Моделирование упругопластического деформирования изотропного стального материала ударника проведено в рамках модели Прандтля-Рейсса.

Постановка задачи. Численное моделирование проведено в трехмерной постановке с помощью метода конечных элементов, который модифицирован Г.Р. Джонсоном для задач удара [7]. Моделировалось нормальное нагружение цилиндрической преграды ударником цилиндрической формы ($d = 15$ мм, $h = 15$ мм). Нагружение производилось со скоростью 300 м/с вдоль направления оси OZ . Рассматриваемые материалы преграды обладали транзитропией механических свойств с плоскостью изотропии, расположенной в плоскости ZOY .

В первом случае в материале преграды вдоль направления OZ задавались минимальные упругие, пластические и прочностные свойства (материал 1): $E_y = 92,1$ ГПа, $E_x = E_z = 86,7$ ГПа, $\nu_{xy} = 0,34$, $\nu_{zx} = 0,33$, $\nu_{yz} = 0,32$, $G_{xy} = G_{yz} = 33$ ГПа, $G_{xz} = 31$ ГПа, $\sigma_{ys} = 350$ МПа, $\sigma_{xs} = \sigma_{zs} = 290$ МПа, $\tau_{xyS} = \tau_{yzS} = 180$ МПа, $\tau_{xzS} = 150$ МПа, $\sigma_{y\beta} = 480$ МПа, $\sigma_{x\beta} = \sigma_{z\beta} = 440$ МПа, $\tau_{xy\beta} = \tau_{yz\beta} = 195$ МПа, $\tau_{xz\beta} = 165$ МПа.

Во втором случае в материале преграды вдоль направления OZ задавались максимальные упругие, пластические и прочностные свойства (материал 2): $E_y = 86,7$ ГПа, $E_x = E_z = 92,1$ ГПа, $\nu_{xy} = 0,34$, $\nu_{zx} = 0,33$, $\nu_{yz} = 0,32$, $G_{xy} = G_{yz} = 31$ ГПа, $G_{xz} = 33$ ГПа, $\sigma_{ys} = 290$ МПа, $\sigma_{xs} = \sigma_{zs} = 350$ МПа, $\tau_{xyS} = \tau_{yzS} = 150$ МПа, $\tau_{xzS} = 180$ МПа, $\sigma_{y\beta} = 440$ МПа, $\sigma_{x\beta} = \sigma_{z\beta} = 480$ МПа, $\tau_{xy\beta} = \tau_{yz\beta} = 165$ МПа, $\tau_{xz\beta} = 195$ МПа.

Здесь E_i — модули Юнга в направлении i ; ν_{ij} — коэффициенты Пуассона; G_{ij} — модули сдвига; σ_{is} — пределы пластичности при растяжении в направлении i ; τ_{ijs} — пределы пластичности при сдвиге; $\sigma_{i\beta}$ — пределы прочности при растяжении в направлении i ; $\tau_{ij\beta}$ — пределы прочности при сдвиге.

Обсуждение результатов. На рисунке 1 представлены зоны разрушенного материала в сечении преграды при сжатии и растяжении (R_d — суммарная доля разрушенного материала), перпендикулярном направлению удара (XOY), под ударником на глубине 1 мм. Плоскость этого сечения совпадает с плоскостью анизотропии (упругие, пластические и прочностные свойства вдоль направлений осей OX и OY отличаются). У материала 1 вдоль направления оси OX задавались минимальные характеристики. Как видно из рисунка 1а, анизотропия механических характеристик материалов оказывает влияние на форму зоны разрушения: она имеет форму эллипса, вытянутого вдоль направления оси, совпадающей с направлением с минимальными свойствами. На рисунке 1б представлены зоны накопленной пластической деформации в материале в том же сечении. Форма этой зоны также имеет форму эллипса, вытянутого вдоль направления оси, совпадающей с направлением с минимальными свойствами. Эллиптичность зоны разрушения близка к эллиптичности зоны с накопленной пластической деформацией.

В сечении преграды в плоскости XOY на рисунке 2 показаны зоны разрушения и распределения значений накопленной пластической деформации для преграды из материала 2, у которого вдоль направления оси OY задавались минимальные характеристики. Максимальная накопленная пластическая деформация в материале 2 в плоскости данного сечения достигает значения 0.097. Зоны разрушенного материала также имеют форму эллипса, вытянутого вдоль направления оси, совпадающей с направлением с минимальными свойствами. Независимо от величины механических характеристик вдоль направления ударного нагружения ориентация зон накопленной пластической деформации и зон разрушенного материала происходит в направлении минимальных механических характеристик материала преграды в случае, если направление минимальных упругих, пластических и прочностных свойств совпадает. При этом выбиваемая пробка на тыльной поверхности, а также кратер на лицевой поверхности преграды имеют круговую форму. Объясняется это тем, что при невысокой степени анизотропии механических свойств металлов и сплавов проявление анизотропии механических свойств материалов преграды концентрируется в ее внутренних областях.

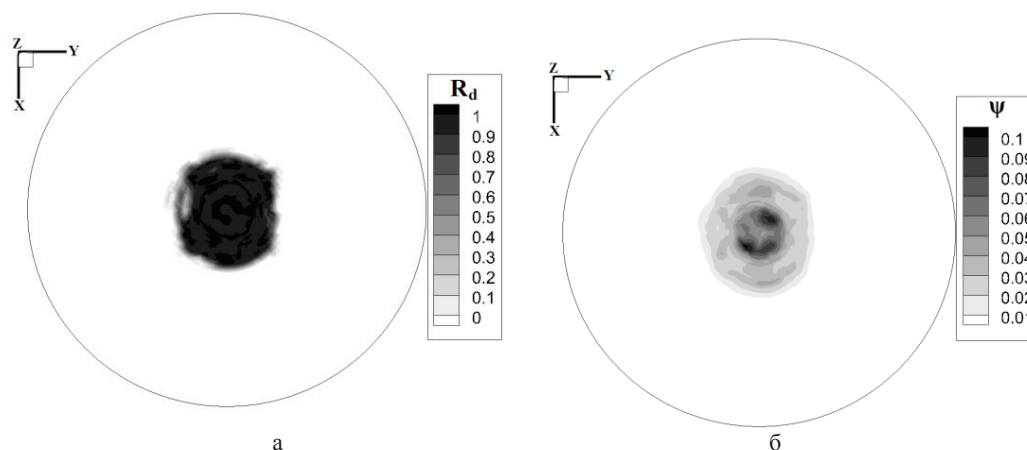


Рис. 1. Зоны разрушения (а) и зоны распределения накопленной пластической деформации (б) в плоскости сечения преграды XOY в момент времени 40 мкс в материале 1

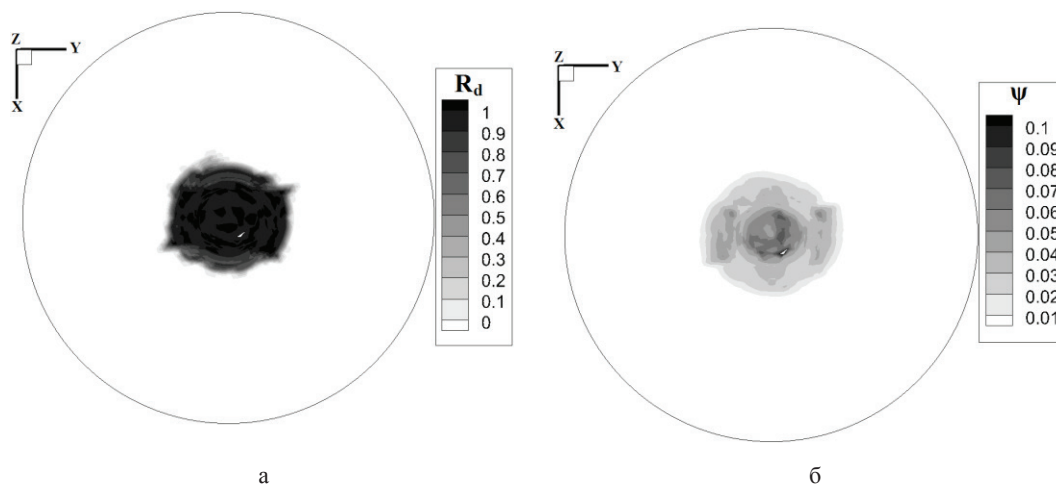


Рис. 2. Зоны разрушения (а) и зоны распределения накопленной пластической деформации (б) в плоскости сечения преграды XOY в момент времени 40 мкс в материале 2

Несмотря на то, что металлы и сплавы обладают невысокой степенью анизотропии, применение модели с учетом анизотропии свойств материала позволяет проводить параметрические исследования ударного нагружения анизотропных материалов и проследить влияние анизотропии на процесс разрушения преграды в трехмерной постановке.

Вывод. При нормальном нагружении преград из анизотропных металлов и сплавов осесимметричными ударниками из изотропных материалов напряженно-деформированное состояние в преграде имеет эллипсоидальную форму.

Библиографический список

1. Седов Л. И. Механика сплошных сред. — М., 1976. — Т. 2.
2. Хилл Р. Математическая теория пластичности. — М., 1956.
3. Ковальчук Б. И., Косарчук В. В., Лебедев А. А. Теория пластического течения анизотропных сред. Сообщение 1. Определяющие соотношения // Проблемы прочности. — 1986. — № 4.
4. Ковальчук Б. И., Косарчук В. В., Лебедев А. А. Экспериментальное исследование законов упрочнения начально-анизотропных материалов // Проблемы прочности. — 1982. — № 9.

5. Туч Е. В., Кривошеина М. Н., Кобенко С. В. Влияние направления проката в материале преграды на ее разрушение при динамических нагрузках // Вестник СГТУ. Сер.: Физ.-мат. науки. — 2011. — № 3 (24).

6. Кривошеина М. Н., Козлова М. А. Влияние учета анизотропии упругих и пластических свойств матери-

ала на результаты расчетов ударного нагружения алюминиевой преграды // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2008. — Т. 14, № 3.

7. Johnson G. R. High velocity impact calculation in three dimensions // J. Appl. Mech. — 1977. — V. 44, № 3.