

УДК 539.3

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗОТРОПНЫХ И АНИЗОТРОПНЫХ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2012 г. Ю. А. Хон^{1,2}, М. Н. Кривошеина², Е. В. Туч³

E-mail: marina_nrk@mail.ru

В работе проводится сравнение результатов расчетов численного моделирования разрушения анизотропных материалов (на примере алюминиевого сплава Д16Т) при динамическом нагружении с использованием изотропного и анизотропного критериев разрушения. В качестве анизотропного критерия разрушения применяется критерий разрушения Мизеса–Хилла, учитывающий анизотропию пределов прочности материала. Для сравнения в другом случае моделируется разрушение анизотропного материала при достижении накопленной пластической деформацией значения 6.5%.

ВВЕДЕНИЕ

При моделировании разрушения анизотропных материалов часто применяются изотропные критерии разрушения, не учитывающие различие пределов прочности в разных направлениях (например, при моделировании разрушения геоматериалов [1, 2]). Это может вносить изменения в результаты расчетов разрушения материала. Для анализа изменений, вносимых в результаты расчетов применением одного из часто используемых изотропных критериев разрушения, были проведены следующие расчеты: разрушение преграды из анизотропного материала с применением критерия разрушения Мизеса–Хилла и разрушение преграды из анизотропного материала с применением изотропного деформационного критерия разрушения. Критерий разрушения Мизеса–Хилла хорошо описывает разрушение материала преграды в виде выбивания пробки. Изотропный деформационный критерий суммирует накопленную в материале пластическую деформацию, которая в большей мере концентрируется в зоне контакта преграды с ударником, и хорошо описывает разрушение в виде кратерообразования.

Как видно из таблицы, в результате проката удлинение при отрыве в материале Д16Т в различных направлениях может различаться почти в 2 раза: от 6.6 до 13.1%. Минимальное удлинение при разрушении происходит по толщине матери-

ала – 6.6%. Так как в данной работе рассматривается разрушение преграды из анизотропного сплава Д16Т со свойствами, минимальными по толщине, то считается, что разрушение наступает тогда, когда накопленная пластическая деформация достигает 6.5%. Таким образом, в деформационном критерии используется минимальное из трех удлинений при отрыве.

1. МОДЕЛЬ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ОРТОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатные движения сжимаемой анизотропной среды, включает в себя [4]

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0,$$

уравнения движения сплошной среды

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \frac{\partial \sigma^{ki}}{\partial x_i} + F^k,$$

уравнение энергии

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma^{ij} e_{ij}.$$

Здесь ρ – плотность среды, \vec{v} – вектор скорости, F^k – компоненты вектора массовых сил, σ_{ij} – контравариантные компоненты симметричного тензора напряжений, E – удельная внутренняя энергия. Компоненты тензора скоростей деформации определяются следующим образом:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i); \quad i, j = 1, 2, 3.$$

e_{ij} – компоненты симметричного тензора скоростей деформаций, v_i – компоненты вектора скорости.

¹ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования. Научно-исследовательский Томский политехнический университет.

² Учреждение Российской академии наук Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, Томск.

³ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования. Национально-исследовательский Томский государственный университет.

Зависимость механических свойств сплава Д16Т от направления волокна [3]

Д16т	Вдоль волокна				Поперек волокна							
					по ширине				по толщине			
	σ_β	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ	σ_β	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ	σ_β	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ
	кгс · мм ⁻²	% %		кгс · мм ⁻²	% %		кгс · мм ⁻²	% %		кгс · мм ⁻²	% %	
	50.1	39.0	11.8	14.5	44.8	31.0	13.1	16.8	41.8	29.3	6.6	8.1

Примечания. Здесь $\sigma_{0.2}$ – пределы текучести при растяжении, σ_β – пределы прочности при растяжении, δ – относительное удлинение при отрыве, ψ – относительное сужение при отрыве.

Введем допущения: полная деформация представима в виде суммы упругой и пластической деформаций ($e = e^e + e^p$), пластическое течение материала не зависит от гидростатического давления (такое предположение возможно для материалов, имеющих невысокую степень анизотропии упругих и пластических свойств), упругие свойства материала не изменяются при пластическом деформировании.

Упругое поведение материала описывается обобщенным законом Гука:

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dt} = C_{ijkl}e_{kl},$$

C_{ijkl} – компоненты тензора упругих постоянных.

Пластическая деформация определяется через функцию пластичности с помощью ассоциированного закона течения в виде

$$de_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}},$$

где параметр $d\lambda = 0$ при упругой деформации, а при пластической всегда положителен и определяется с помощью условия пластичности, de^p – приращение скорости пластической деформации, f – функция пластичности.

Давление как функция удельной внутренней энергии E и плотности ρ для анизотропного материала определяется в зависимости от конкретных условий нагружения из уравнения состояния $P = P(\rho, E)$.

В расчетах скорости нагружения составляли от 300 до 600 м · с⁻¹, при определении гидростатического напряжения использовалась модель баротропной среды.

Процессы пластического деформирования ортотропного материала представим в пятимерных векторных пространствах напряжений S_i и деформаций Э.А.А. Ильюшина: вместо шести зависимых между собой функций S_{ij} Ильюшин А.А. вводит пять независимых функций S_i так, чтобы преобразования были взаимно однозначно линейными [5]. Преобразования компонент девиатора напряжений из шестимерного пространства

в пятимерное можно записать следующим образом [5]:

$$S_1 = \sqrt{\frac{3}{2}}S_{11}, \quad S_2 = \sqrt{2}\left(\frac{1}{2}S_{11} + S_{22}\right), \quad S_3 = \sqrt{2}S_{12}, \\ S_4 = \sqrt{2}S_{23}, \quad S_5 = \sqrt{2}S_{31}.$$

В формулах S_i и S_{ij} – компоненты девиаторов напряжений в пятимерном и шестимерном евклидовом вещественном пространствах соответственно. По такому же правилу происходит преобразование компонент девиаторов деформаций, записанных в пятимерных и шестимерных пространствах.

Поскольку при принятых допущениях шести компонентам тензора напряжений могут быть поставлены в соответствие среднее гидростатическое напряжение и пять независимых компонент девиатора напряжений, для ортотропных материалов в пятимерном пространстве напряжений примем начальное условие текучести [6] в виде, записанном через девиаторы в пятимерном пространстве напряжений:

$$f(S_i) = \left[\eta \sqrt{\left(\frac{S_1^2}{r_1^2} + \frac{S_2^2}{r_2^2} \right)} + (1 - \eta)(C_1 S_1 + C_2 S_2) \right]^2 + \\ + \frac{S_3^2}{r_3^2} + \frac{S_4^2}{r_4^2} + \frac{S_5^2}{r_5^2} = 1,$$

где S_i – компоненты девиаторов напряжений в пятимерном евклидовом вещественном пространстве, r_i и C_i – функции, связанные с пределами текучести материала в направлении осей анизотропии и пределами текучести при сдвиге в плоскостях осей анизотропии:

$$r_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_{1S}, \quad r_2 = \frac{\sqrt{2}\sigma_{1S}(\sigma_{2S} + \sigma_{3S})}{\sqrt{16(\sigma_{1S})^2 - (\sigma_{2S} + \sigma_{3S})^2}}, \\ r_3 = \sqrt{2}\tau_{12S}, \quad r_4 = \sqrt{2}\tau_{23S}, \quad r_5 = \sqrt{2}\tau_{31S}, \\ C_i = C_i(\sigma_{1S}, \sigma_{2S}).$$

Здесь σ_{iS} – пределы текучести в направлении осей симметрии материала, τ_{ijS} – пределы текучести материала при сдвиге в плоскостях анизотропии, η ($0 \leq \eta \leq 1$) – безразмерный параметр, кото-

рый является характеристикой материала и определяется из опытов на двумерное растяжение.

В данной постановке задачи принята модель изотропного упрочнения для описания эволюции поверхности текучести; в этом случае уравнение последующих поверхностей нагружения будет иметь вид

$$F(S_i, R) = \left[\eta \sqrt{\left(\frac{S_1^2}{r_1^2} + \frac{S_2^2}{r_2^2} \right)} + (1 - \eta)(C_1 S_1 + C_2 S_2) \right]^2 + \frac{S_3^2}{r_3^2} + \frac{S_4^2}{r_4^2} + \frac{S_5^2}{r_5^2} - R^2 = 0. \quad (1)$$

Условие пластичности (1) при варьировании константы ($0 \leq \eta \leq 1$) модифицируется в условие пластичности Мизеса–Хилла при ($\eta = 1$) либо в условие Треска, обобщенное на анизотропные материалы при ($\eta = 0$). В данной работе $\eta = 1$.

Для конструкционных сплавов в условиях статического нагружения функция R инвариантна к виду напряженного состояния [7]. Эта функция может быть определена из опытов на простое нагружение и линейно зависит от эффективной пластической деформации ψ :

$$R(\psi) = 1 + \xi\psi,$$

где $\psi = \int (d\mathcal{E}_j^p d\mathcal{E}_j^p)^{\frac{1}{2}}$; для рассматриваемого алюминиевого сплава $\xi = 5.5$, $j, k = \overline{1, 5}$; \mathcal{E}_j^p – компоненты тензора пластической деформации.

Параметры, используемые в условии пластического течения упрочняющегося ортотропного материала, одинаково сопротивляющегося при растяжении и сжатии, определяются из следующих экспериментальных характеристик материала: σ_{1S} , σ_{2S} , σ_{3S} , τ_{12S} , τ_{23S} , τ_{31S} , η .

Для случая транстропии материала преграды используется только пять характеристик пластичности, так как $\sigma_{2S} = \sigma_{3S}$; $\tau_{12S} = \tau_{13S}$.

Чаще всего для моделирования разрушения изотропных материалов применяются критерии разрушения, зависящие от предельного значения следующих величин: максимальное растягивающее напряжение; максимальная растягивающая деформация; максимальная сдвиговая деформация; максимальное касательное напряжение; предельная пластическая деформация сдвига [8]. Аналогичный критерий, основанный на предельной величине удельной работы пластических деформаций, применялся в работе [9] при моделировании разрушения материалов при высокоскоростном нагружении. В нашей работе полагалось, что разрушение наступает, когда накопленная пластическая деформация достигает 6.5% (таблица):

$$\psi = \int (d\mathcal{E}_j^p d\mathcal{E}_j^p)^{\frac{1}{2}} \leq 0.065. \quad (2)$$

Для сравнения в другом случае при численном моделировании деформирования анизотропного материала преграды применялся критерий разрушения Мизеса–Хилла. Критерий Мизеса–Хилла позволяет учитывать различные пределы прочности в различных направлениях в материале, т.е. анизотропию прочностных свойств:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{\beta_{xx}}^2} + \frac{1}{\sigma_{\beta_{yy}}^2} - \frac{1}{\sigma_{\beta_{zz}}^2} \right) (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{\beta_{yy}}^2} + \frac{1}{\sigma_{\beta_{zz}}^2} - \frac{1}{\sigma_{\beta_{xx}}^2} \right) (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{\beta_{zz}}^2} + \frac{1}{\sigma_{\beta_{xx}}^2} - \frac{1}{\sigma_{\beta_{yy}}^2} \right) (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + \frac{1}{\tau_{\beta_{xy}}^2} \tau_{xy}^2 + \\ & + \frac{1}{\tau_{\beta_{yz}}^2} \tau_{yz}^2 + \frac{1}{\tau_{\beta_{xz}}^2} \tau_{xz}^2 = 1, \end{aligned} \quad (3)$$

здесь $\sigma_{\beta_{xx}}$, $\sigma_{\beta_{yy}}$, $\sigma_{\beta_{zz}}$ – технические пределы прочности на растяжение – сжатие вдоль осей OX , OY , OZ , а $\tau_{\beta_{xy}}$, $\tau_{\beta_{yz}}$, $\tau_{\beta_{xz}}$ – технические пределы прочности при сдвиге в плоскостях XOY , YOZ , XOZ соответственно. Согласно критерию разрушения Мизеса–Хилла, пределы прочности материала при растяжении и сжатии считаются равными.

После того как условие разрушения выполнено, деформирование анизотропного материала описывается следующим образом. Если критерий прочности нарушается в условиях сжатия ($e_{kk} \leq 0$), то материал теряет анизотропные свойства, при этом материал сохраняет прочность только на сжатие, компоненты тензора напряжений определяются его шаровой частью: $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij}$.

Если критерий прочности нарушается в условиях растяжения ($e_{kk} > 0$), то материал считается полностью разрушенным, и компоненты тензора напряжений считаются равными нулю ($\sigma_{ij} = 0$).

Напряжения, определенные в элементе, жестко повернутом в пространстве, пересчитываются с помощью производной Яуманна и приводятся к системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{D\sigma^{ij}}{Dt} &= \frac{d\sigma^{ij}}{dt} - \sigma^{ik}\omega_{jk} - \sigma^{jk}\omega_{ik}, \text{ где} \\ \omega_{ij} &= \frac{1}{2}(\nabla_j v_i - \nabla_i v_j). \end{aligned}$$

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ударное нагружение анизотропной алюминиевой преграды изотропным стальным ударником моделировалось численно в трехмерной постановке методом конечных элементов, который модифицирован Г.Р. Джонсоном для задач удара [10] (рис. 1).

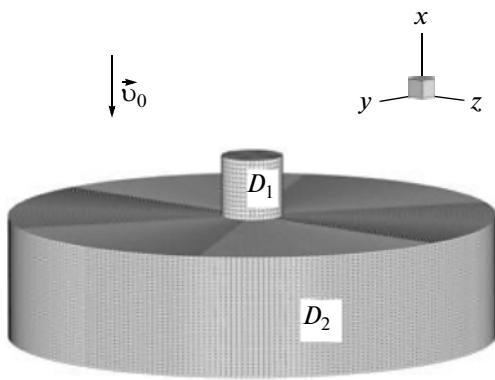


Рис. 1. Объемная начальная конфигурация ударника и преграды.

Начальные условия ($t = 0$):

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= E = w = \\ &= v = 0, \quad u = v_0 \text{ при } (x, y, z) \in D_1, \quad i, j = x, y, z \\ \sigma_{ij} &= E = w = v = u = 0 \text{ при } (x, y, z) \in D_2 \\ \rho &= \rho_i \text{ при } (x, y, z) \in D_i, \quad i = 1, 2 \dots \end{aligned}$$

ρ_i — плотность материалов, E — удельная внутренняя энергия.

Границные условия:

на свободных поверхностях D_1 и D_2 реализованы условия свободной границы

$$T_{nn} = T_{n\tau 1} = T_{n\tau 2} = 0;$$

на контактной поверхности между ударником и преградой реализовано условие скольжения без трения:

$$T_{nn}^+ = T_{nn}^-, \quad T_{n\tau 1}^+ = T_{n\tau 1}^- = T_{n\tau 2}^+ = T_{n\tau 2}^- = 0, \quad v_n^+ = v_n^-.$$

Здесь u , v , w — компоненты вектора скорости по осям OX , OY , OZ соответственно, n — единичный вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке, τ_1 и τ_2 — взаимно перпендикулярные единичные векторы в плоскости, касательной к поверхности в этой точке, T_n — вектор силы на площадке с нормалью n , v — вектор скорости. Нижние индексы векторов T_n и v означают проекции на соответствующие векторы базиса; знак “+” характеризует значение параметров в ударнике, знак “−” — в преграде.

Материал преграды — транстропный сплав Д16Т со следующими характеристиками (направление 1 соответствует направлению ударного нагружения и особой оси OX материала преграды) [6, 7]:

$$\begin{aligned} \rho &= 2700 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad E_1 = 86.7 \text{ ГПа}, \\ E_2 &= E_3 = 92.1 \text{ ГПа}, \quad v_{12} = 0.32, \\ v_{31} &= 0.34, \quad v_{23} = 0.33, \quad G_{12} = G_{13} = 33 \text{ ГПа}, \\ G_{23} &= 31 \text{ ГПа}. \end{aligned}$$

Для описания пластического течения сплава Д16Т использованы следующие его характеристики пластичности [6, 7]:

$$\begin{aligned} \sigma_{1S} &= 290 \text{ МПа}, \quad \sigma_{2S} = \sigma_{3S} = 350 \text{ МПа}, \\ \tau_{12S} &= \tau_{13S} = 150 \text{ МПа}, \quad \tau_{23S} = 180 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Характеристики прочности этого сплава следующие:

$$\begin{aligned} \sigma_{1\beta} &= 440 \text{ МПа}, \quad \sigma_{2\beta} = \sigma_{3\beta} = 480 \text{ МПа}, \\ \tau_{12\beta} &= \tau_{13\beta} = 165 \text{ МПа}, \quad \tau_{23\beta} = 195 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Здесь E_i — модули Юнга, G_{ij} — модули сдвига, v_{ij} — коэффициенты Пуассона анизотропного материала, σ_{iS} — пределы текучести при растяжении, τ_{ijS} — пределы текучести при сдвиге, $\sigma_{i\beta}$ — пределы прочности при растяжении, $\tau_{ij\beta}$ — пределы прочности при сдвиге.

Толщина преграды составляла 30 мм. Нагружение преграды моделировалось ударниками компактной цилиндрической формы: $d = 15$ мм, $h = 15$ мм — 20 г, $d = 7$ мм, $h = 7$ мм — 2 г. Материал ударника — сталь 3, упругопластическое течение материала ударника описывалось моделью Прандтля—Рейсса. Предел текучести стали — 1 ГПа. Разрушение ударника не моделировалось.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2(а, б) представлены графики торможения компактных тяжелых ударников (скорости центра масс ударников) при взаимодействии с преградой из транстропного материала. Кривая 1 — кривая торможения ударника при взаимодействии с преградой из материала, деформирование которого моделировалось с учетом анизотропии упругих, пластических и прочностных характеристик, а в качестве критерия разрушения применен критерий Мизеса—Хилла в напряжениях. Кривая 2 — кривая торможения ударника при взаимодействии с преградой из материала, деформирование которого моделировалось с учетом анизотропии упругих пластических характеристик, а в качестве критерия разрушения применен изотропный деформационный критерий разрушения. Кривая 3 — кривая торможения ударника при взаимодействии с преградой из материала, деформирование которого моделировалось с учетом анизотропии упругих и пластических характеристик и без учета разрушения материала преграды.

Из рис. 2а видно, что различие в скоростях торможения ударников при взаимодействии с преградами из анизотропных материалов, деформирование которых моделируется с применением различных критериев разрушения, появляется уже после 5 мкс процесса нагружения (ударная волна сжатия достигает тыльной поверхности преграды). Максимальное различие в скоростях

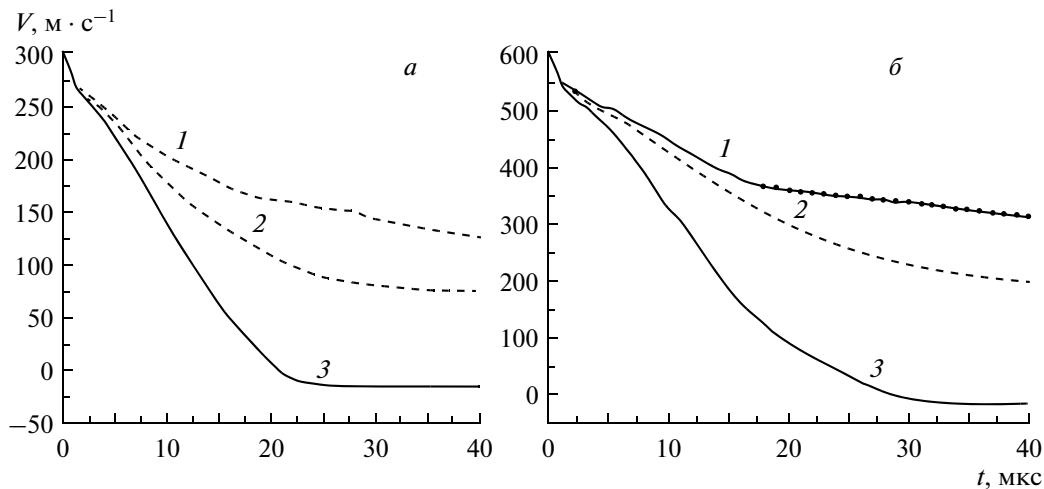


Рис. 2. Кривые торможения компактных ударников ($m = 20$ г) при использовании различных критериев разрушения.

торможения тяжелых ударников достигает $67 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при начальной скорости нагружения $300 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 2а). Преграда из материала, деформируемого упругопластически, не испытывает разрушения, поэтому ударник при столкновении с ней быстро теряет скорость до 0 (в 20 мкс) и происходит отскок ударника. В обоих случаях при моделировании разрушения (кривые 1 и 2 рис. 2) ударник тормозится медленнее (в 40 мкс их скорости не равны нулю) по сравнению с расчетом без учета разрушения материала преграды.

При повышении скорости нагружения до $600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ результаты расчетов аналогичные (рис. 2б). Различие в скоростях ударников, при взаимодействии с преградами из анизотропных материалов, деформирование которых моделируется с применением различных критериев разрушения, достигает $100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (40 мкс).

На рис. 3, 4 представлены суммарные зоны разрушения при растяжении и сжатии в сечении материала при использовании различных критериев разрушения. При моделировании деформирования материала с использованием изотропного деформационного критерия разрушения зона разрушения концентрируется в большей степени

вокруг ударника (рис. 3). Это объясняется тем, что максимальные пластические деформации в материале преграды при динамическом нагружении (с небольшой начальной скоростью нагружения) образуются непосредственно под ударником и вокруг него, не распространяясь в глубину преграды. В качестве критерия пластичности применен критерий пластичности Мизеса–Хилла. В преграде в этом случае происходит выдавливание “пробки”, как было показано в работе Астанина В.В., Галиева Ш.У., Иващенко К.Б. [11].

При использовании анизотропного критерия разрушения Мизеса–Хилла при численном моделировании динамического нагружения преграды из анизотропного материала, разрушение будет происходить в областях, где достигнутые напряжения превышают предел прочности материала. Зона разрушения имеет больший радиус, ударник внедряется в преграду на 30% больше при начальной скорости нагружения $300 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, чем при использовании изотропного деформационного критерия разрушения (рис. 4).

На рис. 5а, б представлены графики торможения компактных легких ($m = 2$ г) ударников при взаимодействии с преградой из транстропного материала. Различие в скоростях торможения лег-

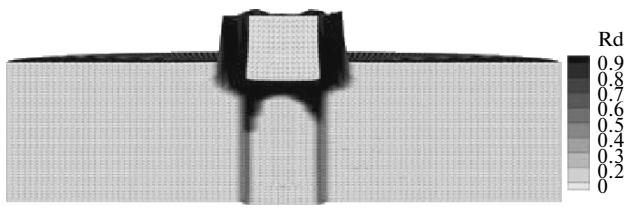


Рис. 3. Зоны разрушения в 40 мкс при использовании изотропного критерия разрушения ($V_0 = 300 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

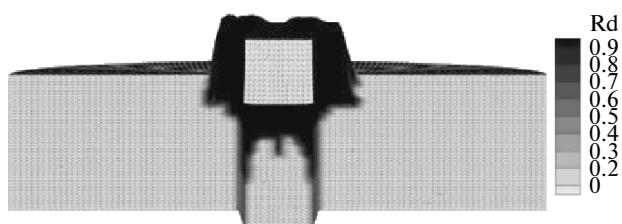


Рис. 4. Зоны разрушения в 40 мкс при использовании критерия разрушения Мизеса–Хилла ($V_0 = 300 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

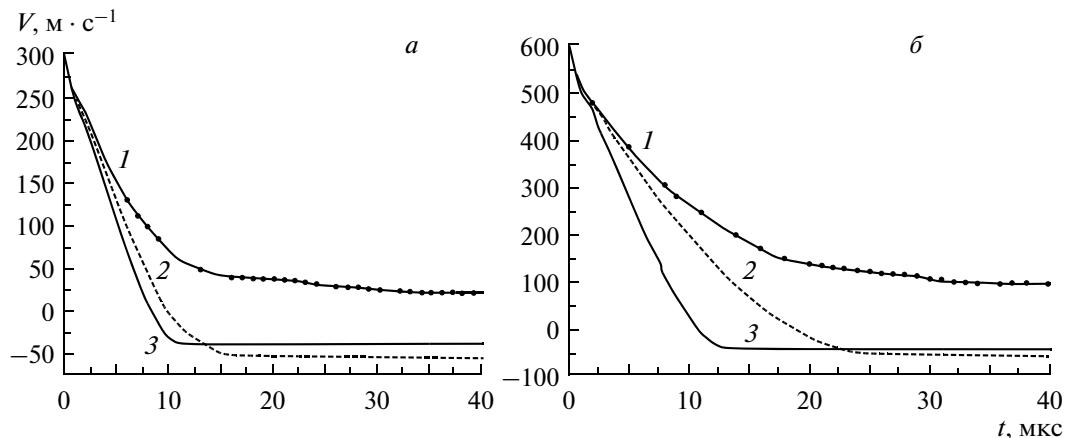


Рис. 5. Кривые торможения компактных ударников ($m = 2$ г) при использовании различных критериев разрушения.

ких ударников при взаимодействии с преградами из анизотропных материалов, деформирование которых моделируется с применением различных критериев разрушения достигает $100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при начальной скорости нагружения $300 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 5a). При повышении скорости нагружения до $600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ различие в скоростях торможения ударников увеличивается до $170 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 5б).

При нагружении преграды компактным ударником меньшей массы (2 г) различие в картинах разрушения анизотропных преград увеличивается. На рис. 6, 7 представлены суммарные зоны разрушения в материалах преград при нагружении легким компактным ударником со скоростью 600 м/с при использовании различных критериев разрушения.

При использовании критерия разрушения Мизеса–Хилла в материале преграды к 40 мкс процесса нагружения с тыльной поверхности выбивается пробка, и зона разрушения достигает тыльной поверхности преграды (рис. 7). В то время как при использовании изотропного деформационного критерия разрушения зона разрушения локализуется вокруг ударника и достигает $1/2$ высоты преграды, и в преграде в данный момент времени не происходит выбивание “пробки”

(рис. 6). Разрушение здесь происходит в большей степени за счет кратерообразования. Глубина внедрения легкого ударника при использовании критерия Мизеса–Хилла на 57% больше при начальной скорости нагружения $600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким образом, при численном моделировании динамического нагружения преград из транспортного алюминиевого сплава Д16Т применение изотропного деформационного критерия разрушения может вносить существенные изменения в результаты расчетов разрушения анизотропного материала. Различие в скоростях ударников при столкновении с преградами из анизотропных материалов, деформирование которых моделируется с применением различных критериев разрушения, достигает $67–100 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при начальных скоростях нагружения 300 и $600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно. Различия в зонах разрушения анизотропных материалов увеличиваются при уменьшении массы ударников и увеличении начальной скорости нагружения. При использовании изотропного деформационного критерия разрушения в материале преграды разрушение концентрируется в зоне вокруг ударника, при использовании критерия разрушения Мизеса–Хилла – в зоне кратера.

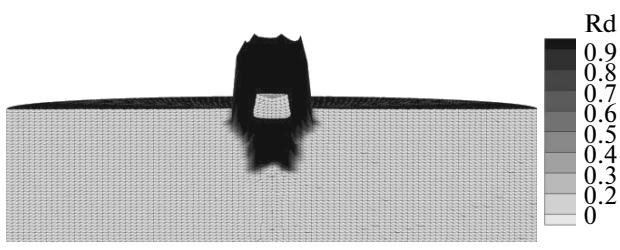


Рис. 6. Зоны разрушения в материале в 40 мкс при использовании изотропного критерия разрушения, $V_0 = 600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

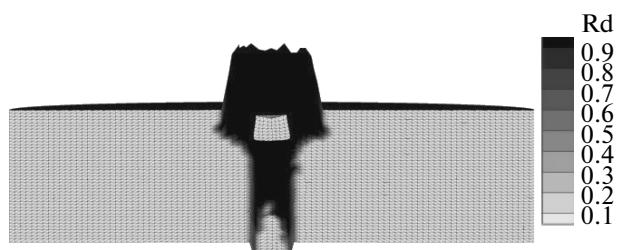


Рис. 7. Зоны разрушения в материале в 40 мкс при использовании критерия разрушения Мизеса–Хилла, $V_0 = 600 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

ла в материале преграды разрушение распространяется в глубь преграды.

ВЫВОДЫ

При численном моделировании динамического нагружения преград из анизотропных материалов применение деформационного изотропного критерия разрушения (по сравнению с критерием разрушения Мизеса–Хилла) приводит к изменению картины деформирования и разрушения материала:

- 1) внедрение тяжелого ударника в преграду на 30% меньше;
- 2) суммарная область разрушения при растяжении и при сжатии меньше, чем при использовании критерия Мизеса–Хилла;
- 3) различие в скоростях торможения тяжелых ударников (20 г) достигает $67 \text{ м} \cdot \text{s}^{-1}$, легких – $100 \text{ м} \cdot \text{s}^{-1}$ при начальной скорости нагружения $300 \text{ м} \cdot \text{s}^{-1}$; различие в скоростях торможения тяжелых ударников достигает $100 \text{ м} \cdot \text{s}^{-1}$, легких $150 \text{ м} \cdot \text{s}^{-1}$ – при начальной скорости нагружения $600 \text{ м} \cdot \text{s}^{-1}$.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельникова Н.А., Немирович-Данченко М.М. // Физ. мезомеханика. 2006. Т. 9. № 1. С. 103.
2. Немирович-Данченко М.М., Мельникова Н.А. // Физ. мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 127.
3. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1978. С. 208.
4. Седов Л.И. Механика сплошных сред. М.: Наука, 1976. Т. 2. 574 с.
5. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во. АН СССР, 1963. 271 с.
6. Косарчук В.В., Ковалчук Б.И., Лебедев А.А. // Пробл. прочности. 1986. № 4. С. 50.
7. Косарчук В.В., Ковалчук Б.И., Лебедев А.А. // Пробл. прочности. 1982. № 9. С. 3.
8. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.
9. Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г., Югов А.А. Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. Томск: Northampton, 2005. 356 с.
10. Johnson G.R. / J. Appl. Mech. 1977. V. 44. № 3. P. 95.
11. Астанин В.В., Галиев Ш.У., Иващенко К.Б. // Пробл. прочности. 1988. № 12. С. 52.