

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЯ РАЗРУШЕНИЯ МИЗЕСА-ХИЛЛА К ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПРЕГРАД ИЗ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

М.Н. Кривошеина
ИФПМ СО РАН, г. Томск
e-mail: marina_nkr@mail.ru

М.А. Козлова
ИФПМ СО РАН, г. Томск
e-mail: kozlova_ma@mail.ru

И.Ю. Коньшева
НИ ТПУ, г. Томск

С.В. Кобенко
ГОУ ВПО НГТУ, г. Нижневартовск
e-mail: sergeyvk@inbox.ru

Е.В. Туч
ГОУ ВПО ТГУ, г. Томск
e-mail: elenatuch@yandex.ru

В работе приведен сравнительный анализ результатов численного моделирования динамического нагружения преград из материалов с различной степенью анизотропии механических свойств стальными изотропными ударниками. В первом случае на примере трансформного алюминиевого сплава Д16Т численно моделируется поведение упрочняющегося начально анизотропного материала (отношение упругих характеристик сплава Д16Т в продольном и поперечном направлении составляет 0,94). Во втором случае в качестве материала преграды рассматривался органопластик, характеризующийся высокой степенью анизотропии механических свойств (отношение механических характеристик в продольном и поперечном направлении составляет 0,15). Поведение данного типа материалов при динамических нагрузках описывается в рамках упруго-хрупкой модели. При моделировании деформирования анизотропных материалов применялся критерий разрушения Мизеса-Хилла.

1. Постановка задачи

Ударное нагружение анизотропной преграды изотропным стальным ударником моделировалось численно в трехмерной постановке методом конечных элементов, который модифицирован Г.Р. Джонсоном для задач удара [1]. Численное моделирование проведено с помощью оригинальных программ. Преграда цилиндрическая: $d=120\text{мм}$,

$h=30$ мм; ударник цилиндрический компактный: $d=15$ мм, $h=15$ мм. Материал ударника – Сталь 3, предел текучести – 1ГПа. Скорость нагружения во всех случаях – 200м/с.

Начальные условия $t = 0$:

$$\sigma_{ij} = E = u = v = 0, \quad w = v_0 \text{ при } (x, y, z) \in D_1, \quad i, j = x, y, z$$

$$\sigma_{ij} = E = u = v = w = 0 \text{ при } (x, y, z) \in D_2$$

$$\rho = \rho_i \text{ при } (x, y, z) \in D_i, \quad i = 1, 2.$$

ρ_i – плотность материалов, E – удельная внутренняя энергия, u, v, w – компоненты вектора скорости в направлении осей OX, OY, OZ – соответственно.

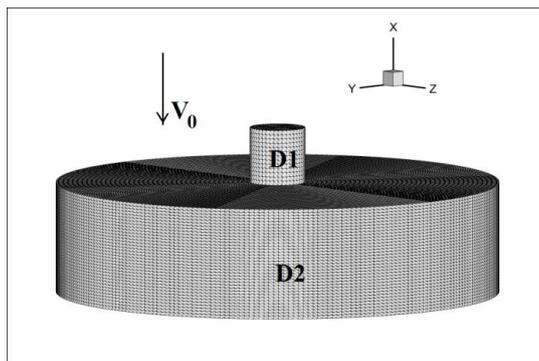


Рис. 1 Объемная начальная конфигурация ударника и преграды

Граничные 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

$$T_{nn}^+ = T_{nn}^-, T_{n\tau_1}^+ = T_{n\tau_1}^-, T_{n\tau_2}^+ = T_{n\tau_2}^- = 0, v_n^+ = v_n^-.$$

Здесь 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 вектора базиса; знак “+” характеризует значение параметров в ударнике, знак “-” характеризует значение параметров в преграде [2].

2. Математическая модель

Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатные движения сжимаемой анизотропной среды, включает в себя: уравнение неразрывности, уравнения движения сплошной среды, уравнение энергии [3].

Введены допущения: полная деформация представима в виде суммы упругой и пластической деформаций; переход в пластическое течение материала не зависит от уровня 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 анизотропного материала описывается обобщенным законом Гука. Пластическая деформация для алюминиевого сплава Д16Т определяется с помощью ассоциированного закона течения. Процессы пластического деформирования ортотропного материала представлены в пятимерных векторных пространствах напряжений S_i и деформаций \mathcal{E}_i . А.А. Ильюшина: вместо 6 зависимых между собой функций S_{ij} Ильюшин А.А. ввел [4] 5 независимых функций S_i так, чтобы преобразования были взаимно-однозначно линейными. Преобразования компонент девиатора напряжений из шестимерного пространства в пятимерное можно записать следующим образом [4]:

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

В формулах S_i и S_{ij} – компоненты девиаторов напряжений в пятимерном и шестимерном евклидовых вещественных 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 в соответствие поставлены среднее гидростатическое напряжение и пять независимых компонент девиатора напряжений, то для ортотропных материалов в пятимерном пространстве напряжений примем начальное условие пластичности [5] в виде, записанном через девиаторы в пятимерном пространстве напряжений

$$f(S_i) = \frac{S_1^2}{r_1^2} + \frac{S_2^2}{r_2^2} + \frac{S_3^2}{r_3^2} + \frac{S_4^2}{r_4^2} + \frac{S_5^2}{r_5^2} = 1,$$

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

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

Здесь σ_{iS} – пределы текучести в направлении осей симметрии материала, τ_{ijs} – пределы текучести материала при сдвиге в плоскостях анизотропии. Параметры, используемые в условии пластического течения упрочняющегося ортотропного материала, одинаково сопротивляющегося при растяжении и сжатии, определяются из следующих экспериментальных характеристик материала: $\sigma_{1S}, \sigma_{2S}, \sigma_{3S}, \tau_{12S}, \tau_{23S}, \tau_{31S}$.

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

$$F(S_i, R) = \frac{S_1^2}{r_1^2} + \frac{S_2^2}{r_2^2} + \frac{S_3^2}{r_3^2} + \frac{S_4^2}{r_4^2} + \frac{S_5^2}{r_5^2} - R^2 = 0.$$

Для конструкционных сплавов в условиях статического нагружения функция R инвариантна к виду напряженного состояния [6]. Эта функция может быть определена из опытов на простое нагружение и линейно зависит от эффективной пластической деформации ψ : $R(\psi) = 1 + \xi\psi$,

где $\psi = \int \left(\mathcal{E}_j^p d\mathcal{E}_j^p \right)^{\frac{1}{2}}$; для рассматриваемого алюминиевого сплава Д16Т $\xi = 5,5$.

При моделировании деформирования металлов применяется критерий прочности Мизеса-Хилла, он хорошо описывает сдвиговой механизм разрушения.

Поэтому в качестве критерия разрушения применялся критерий Мизеса-Хилла, записанный в шестимерной ортогональной системе координат

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{\beta xx}^2} + \frac{1}{\sigma_{\beta yy}^2} - \frac{1}{\sigma_{\beta zz}^2} \right) (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{\beta yy}^2} + \frac{1}{\sigma_{\beta zz}^2} - \frac{1}{\sigma_{\beta xx}^2} \right) (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 +$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{\beta zz}^2} + \frac{1}{\sigma_{\beta xx}^2} - \frac{1}{\sigma_{\beta yy}^2} \right) (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + \frac{1}{\tau_{\beta xy}^2} \tau_{xy}^2 + \frac{1}{\tau_{\beta yz}^2} \tau_{yz}^2 + \frac{1}{\tau_{\beta xz}^2} \tau_{xz}^2 = 1,$$

$\sigma_{\beta ii}$ – пределы прочности материала при растяжении в направлении i , $\tau_{\beta xz}$ – пределы прочности материала при сдвиге в двух противоположных направлениях при $i \neq j$.

Согласно этому критерию разрушения пределы прочности материала при растяжении и сжатии считаются равными.

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

В органопластиках давление вычисляется с помощью уравнения состояния [7]

$$p = \left[\exp \left(4\beta \frac{V_0 - V}{V_0} \right) - 1 \right] \frac{\rho_0 \alpha^2}{4\beta},$$

здесь $\rho_0 = 1350 \text{ кг/м}^3$, начальная плотность материала, V_0, V – относительный начальный и текущий объемы. Скорость ударной волны вычисляется из ударной адиабаты $D = \alpha + \beta u$, где $\alpha = 1400 \text{ м/с}$, $\beta = 2,25$, а u – массовая скорость.

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

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

Сильно анизотропный органопластик обладает ортотропией механических свойств. В направлении нагружения имеет минимальные упругие и прочностные свойства. Металлический сплав Д16Т обладает трансотропией механических свойств. В направлении нагружения также обладает минимальными упругими, пластическими и прочностными характеристиками.

3. Обсуждение результатов

На рис. 2 представлены зоны разрушения при растяжении (а) и при сжатии (б) в преграде из металлического сплава Д16Т в момент времени 50 мкс. К этому моменту времени в преграде, в зоне кратера, образуются значительные выплески. Под ударником образуется небольшая зона разрушения при растяжении, а в преграде с тыльной поверхности выбивается "пробка".

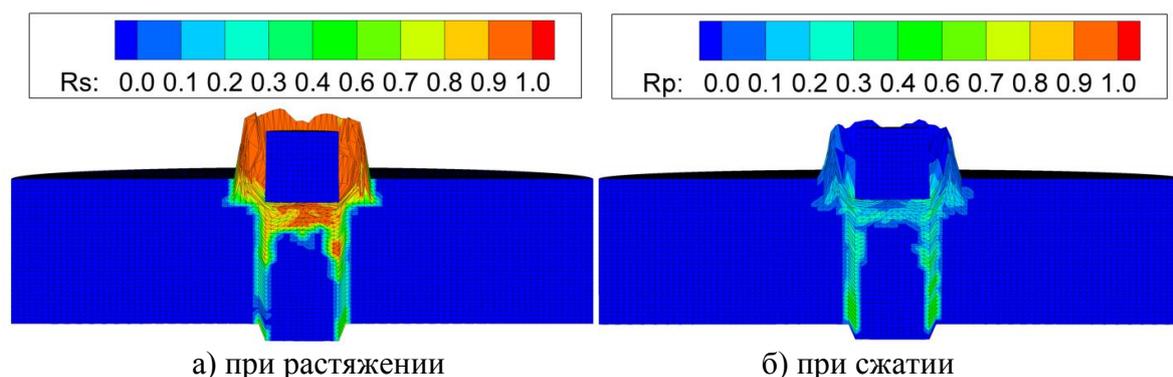


Рис. 2 Зоны разрушения в металлической преграде в момент времени 50мкс

Критерием правильности расчетов в широком диапазоне скоростей соударения может служить соответствие конечных характеристик взаимодействующих тел, полученных расчетным и экспериментальным путем. Поэтому было проведено сравнение глубины внедрения ударника в преграду конечной толщины с экспериментальными данными. В работах Астанина А. В., Галиева Ш. У., Иващенко К. Б. [8] рассматривалось внедрение «прямого кругового стального цилиндра» в преграду конечной толщины из изотропного алюминиевого сплава. Преграда представляла собой плоскую плиту размером $150 \times 150 \text{ мм}^2$ толщиной 30мм из сплава АМг6, а ударник длиной 50мм и диаметром 14.5мм выполнен из стали 5ХНМА. Скорости нагружения – 138м/с и 234м/с. Характеристики стали: $\rho_0 = 7.86 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $G = 84 \text{ ГПа}$, $\nu = 0.3$, $E = 218.4 \text{ ГПа}$, $\sigma_T = 860 \text{ МПа}$. Характеристики сплава АМг6: $\rho_0 = 2.78 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $G = 35 \text{ ГПа}$, $\nu = 0.3148$, $E = 92.36 \text{ ГПа}$, $\sigma_T = 170 \text{ МПа}$. Сравнивались глубины внедрения ударника при различных скоростях.

Таблица 1. Сравнение расчетных данных с экспериментальными

	Глубина внедрения ударника, мм		Относительная погрешность δ , %	
	V=138м/с	V=234м/с	V=138м/с	V=234м/с
Расчет	3	7,2	6	2,8
Эксперимент	3,2	7	–	–

Таким образом, в рамках используемой модели с помощью описанного численного метода можно с достаточной степенью точности анализировать процесс внедрения ударника в преграду и выбивание пробки.

Далее проводилось моделирование разрушения преграды из органопластика, деформирование которого происходит в рамках упруго-хрупкой модели. На рис. 3 представлены зоны разрушения при растяжении (а) и при сжатии (б) в преграде из органопластика в момент времени 50мкс. В момент прохождения первой волны сжатия, было установлено, что значения сжимающих напряжений (в материале преграды под ударником) достигают 450 МПа, что превышает предел прочности органопластика в направлении нагружения. Материал преграды разрушается уже в первые микросекунды процесса нагружения. К 50мкс в материале под ударником образуется значительная зона разрушения в основном при сжатии.

