Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2011. № 3 (24). С. 52–61

Механика деформируемого твёрдого тела

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРОКАТА В МАТЕРИАЛЕ ПРЕГРАДЫ НА ЕЁ РАЗРУШЕНИЕ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Е. В. Туч[1]***, М. Н. Кривошеина***[1]***, С. В. Кобенко***[2]

[1] Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
634021, Россия, г. Томск, пр-т Академический 2/4.
[2] Нижневартовский государственный гуманитарный университет,
628605, Россия, г. Нижневартовск, ул. Ленина 56

E-mails: elenatuch@yandex.ru, marina_nkr@mail.ru, sergeyvk@inbox.ru

Проведён сравнительный анализ упругопластического деформирования и разрушения материалов преград с различным направлением проката относительно направления нагружения преграды. Численно в трёхмерной постановке моделировалось динамическое нагружение преград из материалов, характеризующихся начальной анизотропией механических свойств в результате проката. Моделирование проводилось с помощью метода конечных элементов.

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

Введение. При формовании в материалах в результате пластической деформации возникает анизотропия механических свойств. Направление механических свойств в анизотропных материалах влияет на деформационное поведение и разрушение изделий из таких материалов при динамическом нагружении. При изготовлении полуфабриката изделия в нём могут задаваться определенные свойства в нужном направлении. В одном случае значения свойств материала полуфабриката по толщине могут быть выше, чем в остальных направлениях, а в другом случае — ниже, чем в остальных направлениях.

Цель данной работы — исследование влияния направления проката в материале преграды относительно направления ударного нагружения на её деформирование и разрушение.

1. Модель упругопластического деформирования и разрушения ортотропных материалов. Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатные движения сжимаемой анизотропной среды, включает в себя [1]:

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div} \rho v = 0;$$

Елена Владимировна Туч, аспирант, лаб. физики нелинейных сред. *Марина Николаевна Кривошеина* (к.ф.-м.н., доц.), старший научный сотрудник, лаб. физики нелинейных сред. *Сергей Викторович Кобенко* (к.ф.-м.н., доц.), доцент, каф. информатики и методики преподавания информатики.

– уравнения движения сплошной среды:

$$\rho \frac{dv^k}{dt} = \frac{\partial \sigma^{ki}}{\partial x_i} + F^k;$$

– уравнение энергии:

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

Здесь ρ — плотность среды, 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:

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

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

Введём допущения: полная деформация представима в виде суммы упругой и пластической деформаций; 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 обобщённым законом Гука

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

где C_{ijkl} — компоненты тензора упругих постоянных.

Пластическая деформация определяется с помощью ассоциированного закона течения в виде

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

где $d\lambda = 0$ при упругой деформации, а при пластической $d\lambda > 0$ и определяется с помощью условия пластичности, $d\varepsilon_{ij}^p$ — приращение пластической деформации, f — функция пластичности.

В дальнейших расчётах нагружение моделировалось со скоростью 300 м/с, поэтому при определении гидростатического напряжения использовалась модель баротропной среды.

Процессы пластического деформирования ортотропного материала представим в пятимерных векторных пространствах напряжений S_i и деформаций $Э_i$ А. А. Ильюшина: вместо шести зависимых между собой функций S_{ij} А. А. Ильюшин вводит пять независимых функций S_i так, чтобы преобразования были взаимно-однозначно линейными [2]. Преобразования компонент девиатора напряжений из шестимерного пространства в пятимерное можно записать следующим образом [2]:

$$S_1 = \sqrt{3/2} S_{11}, \quad S_2 = \sqrt{2}\Big(\frac{1}{2} S_{11} + S_{22}\Big),$$

$$S_3 = \sqrt{2}S_{12}, \quad S_4 = \sqrt{2}S_{23}, \quad S_5 = \sqrt{2}S_{31}.$$

В формулах S_i и S_{ij} — компоненты девиаторов напряжений в пятимерном и шестимерном 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 поставлены в соответствие среднее гидростатическое напряжение и пять независимых компонент девиатора напряжений, для ортотропных материалов в пятимерном пространстве напряжений примем начальное условие пластичности [3] в виде, записанном через девиаторы в пятимерном пространстве напряжений

$$f(S_i) = \left[\eta\sqrt{\left(\frac{S_1^2}{r_1^2} + \frac{S_2^2}{r_2^2}\right)} + (1-\eta)(C_1S_1 + C_2S_2)\right]^2 + \frac{S_3^2}{r_3^2} + \frac{S_4^2}{r_4^2} + \frac{S_5^2}{r_5^2} = 1, \quad (1)$$

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

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

Здесь σ_{iS} — пределы текучести в направлении осей симметрии материала, τ_{ijS} — пределы текучести материала при сдвиге в плоскостях анизотропии. При $\eta = 1$ условие (1) преобразуется в условие пластичности Мизеса—Хилла. 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 трастропии материала преграды используется только пять характеристик пластичности, так как $\sigma_{2s} = \sigma_{3s}$; $\tau_{12s} = \tau_{13s}$.

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

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

Для конструкционных сплавов в условиях статического нагружения функция R инвариантна к виду напряженного состояния [4]. Эта функция может быть определена из опытов на простое нагружение и линейно зависит от эффективной пластической деформации ψ:

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

где $\psi = \int \left(d\text{Э}^p_j d\text{Э}^p_j\right)^{\frac{1}{2}}$. Для рассматриваемых в дальнейших расчётах алюминиевых сплавов $\xi = 5{,}5$.

Запишем обобщенный закон Гука для анизотропных сред в приращениях в пятимерном пространстве:

$$dS_j = D_{kj}\left(d\text{Э}_k - d\text{Э}^p_k\right) = D_{kj}\left(d\text{Э}_k - d\lambda\frac{\partial F}{\partial S_k}\right),$$

где D_{kj} — компоненты матрицы упругих постоянных в пятимерном пространстве (индексы j и k принимают значения от 1 до 5); Э, Э^p — полная и пластическая деформации соответственно, а $d\lambda$ определяется через функцию пластичности.

Разрушение анизотропного материала преграды в волнах сжатия и растяжения происходит при выполнении критерия разрушения Мизеса—Хилла, записанного в декартовой системе координат:

$$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{X_1^2}+\frac{1}{X_2^2}-\frac{1}{X_3^2}\right)(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{X_2^2}+\frac{1}{X_3^2}-\frac{1}{X_1^2}\right)(\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2+$$
$$+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{X_3^2}+\frac{1}{X_1^2}-\frac{1}{X_2^2}\right)(\sigma_{zz}-\sigma_{xx})^2+\frac{1}{X_{12}^2}\tau_{xy}^2+\frac{1}{X_{23}^2}\tau_{yz}^2+\frac{1}{X_{13}^2}\tau_{xz}^2=1.$$

Здесь X_i — пределы прочности при растяжении и сжатии в направлении i, X_{ij} — пределы прочности при сдвиге в двух противоположных направлениях при $i \neq j$. Согласно критерию разрушения Мизеса—Хилла пределы прочности материала при растяжении и сжатии считаются равными. После того как условие разрушения выполнено, деформирование анизотропного материала моделируется следующим образом. Если критерий прочности нарушается в условиях сжатия ($e_{kk} \leqslant 0$), 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, определённые в элементе, жёстко повернутом в пространстве, пересчитываются с помощью производной Яуманна:

$$\frac{D\sigma^{ij}}{Dt} = \frac{d\sigma^{ij}}{dt} - \sigma^{ik}\omega_{jk} - \sigma^{jk}\omega_{ik},$$

где $\omega_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla_j v_i - \nabla_i v_j)$.

1. Постановка задачи. В настоящей работе проводилось численное моделирование динамического нагружения преграды из анизотропного материала со свойствами, различно ориентированными относительно оси нагружения. Схема нагружения приведена на рис. 1. В качестве материала преграды применялся алюминиевый сплав Д16Т.

В первом случае вдоль направления оси нагружения (Ox) задавались максимальные упругие, пластические и прочностные свойства в материале (материал 1): $E_1 = 92{,}1$ ГПа, $E_2 = E_3 = 86{,}7$ ГПа, $\nu_{12} = 0{,}33$, $\nu_{31} = 0{,}32$, $\nu_{23} = 0{,}34$,

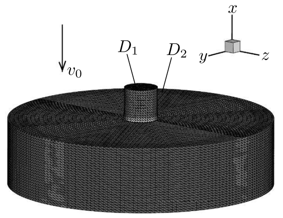


Рис. 1. Объёмная начальная конфигурация ударника и преграды

$G_{12} = G_{13} = 31$ ГПа, $G_{23} = 33$ ГПа, $\eta = 1$, $\sigma_{1T} = 350$ МПа, $\sigma_{2T} = \sigma_{3T} = 290$ МПа, $\tau_{12T} = \tau_{13T} = 180$ МПа, $\tau_{23T} = 150$ МПа, $\sigma_{1\beta} = 480$ МПа, $\sigma_{2\beta} = \sigma_{3\beta} = 440$ МПа, $\tau_{12S} = \tau_{13S} = 195$ МПа, $\tau_{23S} = 165$ МПа.

Во втором случае — минимальные свойства (материал 2): $E_1 = 86{,}7$ ГПа, $E_2 = E_3 = 92{,}1$ ГПа, $\nu_{12} = 0{,}32$, $\nu_{31} = 0{,}34$, $\nu_{23} = 0{,}33$, $G_{12} = G_{13} = 33$ ГПа, $G_{23} = 31$ ГПа, $\sigma_{1T} = 290$ МПа, $\sigma_{2T} = \sigma_{3T} = 350$ МПа, $\tau_{12T} = \tau_{13T} = 150$ МПа, $\tau_{23T} = 180$ МПа, $\eta = 1$, $\sigma_{1\beta} = 440$ МПа, $\sigma_{2\beta} = \sigma_{3\beta} = 480$ МПа, $\tau_{12S} = \tau_{13S} = 165$ МПа, $\tau_{23S} = 195$ МПа.

Начальные условия ($t = 0$):
- $\sigma_{ij} = E = u = v = 0$, $w = v_0$ при $(x,\, y,\, z) \in D_1$;
- $\sigma_{ij} = E = u = v = w = 0$ при $(x,\, y,\, z) \in D_2$;
- $\rho = \rho_i$ при $(x,\, y,\, z) \in D_i$, $i = 1, 2$.

Здесь ρ_i — плотности материалов; E — удельная внутренняя энергия; u, v, w — компоненты вектора скорости в направлении осей Ox, Oy, Oz соответственно.

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

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 векторы базиса; знак «+» характеризует значение параметров в ударнике, знак «−» характеризует значение параметров в преграде [5].

Нагружение преграды производилось со скоростью 300 м/с. Ударники имели различные геометрические формы и массы: дискообразный тяжёлый ($d = 30$ мм, $h = 3{,}75$ мм), удлинённый тяжелый ($d = 8{,}66$ мм, $h = 15$ мм) массой 20 г; компактный ($d = 7$ мм, $h = 7$ мм), удлинённый ($d = 4{,}94$ мм, $h = 14$ мм) массой 2 г. Задача решалась численно в трёхмерной постановке методом конечных элементов, который модифицирован Г. Р. Джонсоном для задач удара [6]. Численное моделирование проведено с помощью оригинальных программ, разработанных для решения задач механики твёрдого тела при динамических нагрузках с учётом разрушения материала. Были проведены тестовые расчёты, подтверждающие достоверность расчётов разработанного программного комплекса [7].

3. Обсуждение результатов. На рис. 2 представлены кривые торможения центра масс тяжелых дискообразных ударников при соударении с преградами из материалов 1, 2: кривая 1 соответствует торможению ударника, сталкивающегося с преградой из материала 1; кривая 2 — торможению ударника, сталкивающегося с преградой из материала 2. Из рис. 2 видно, что при нагружении дискообразным ударником кривые начинают расходиться уже при 5 мкс, и кривая 1 во всё время процесса нагружения располагается ниже кривой 2, то есть ударник тормозится быстрее при взаимодействии с преградой из материала 1, чем при взаимодействии с преградой из материала 2.

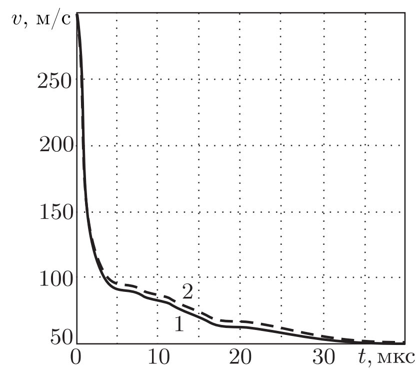


Рис. 2. Кривые торможения дискообразных ударников при соударении с преградами из материалов 1 и 2 (d = 30 мм, h = 3,75 мм)

Максимальное различие в скоростях дискообразных ударников при соударении с преградами из материалов с различным направлением механических свойств относительно направления удара небольшое — 8 м/с. Это можно объяснить тем, что данный сплав обладает невысокой степенью анизотропии механических свойств. Отношение предела прочности в направлении удара к пределу прочности в плоскости преграды составляет 0,92.

Приведённые различия в конфигурации кривых торможения иллюстрируют отличие в волновой картине деформирования материалов преград. На рис. 3 представлено распределение σ_{xx} (компоненты напряжений в направлении удара в материалах преград) в момент времени 5 мкс. Скорость распространения волн в материалах 1 и 2 различная, поэтому в преградах из этих материалов реализуется различная волновая картина в один момент времени. В момент времени 5 мкс в материале 1 волна сжатия успевает достигнуть тыльной поверхности преграды и отразиться волной растяжения (рис. 3, *а*), в то время как в материале 2 она только подходит к тыльной поверхности преграды (рис. 3, *б*).

Таким образом, в преградах с различным направлением проката материала относительно направления нагружения реализуется различная волновая картина. Поэтому напряжённо-деформированное состояние преград из материалов 1 и 2 также будет различаться.

Так как при численном моделировании нагружения применялся критерий прочности Мизеса—Хилла, разрушение материала, прежде всего, зависит от напряжений сдвига. Полагалось, что в материале 1 максимальный предел

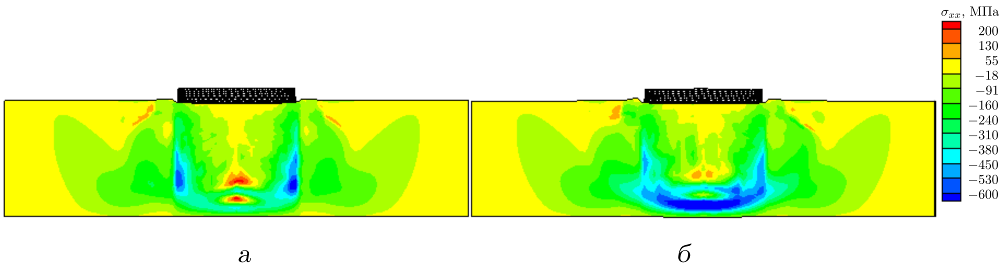


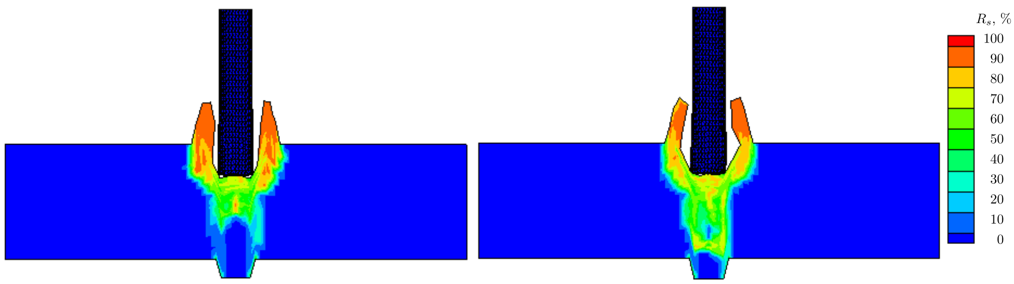
Рис. 3. Распределение компоненты σ_{xx} в преграде из материала 1 (*а*) и материала 2 (*б*) в момент времени 5 мкс при v_0 = 300 м/с

прочности на растяжение – сжатие в направлении нагружения (по отношению к пределам прочности в плоскости преграды) и два предела прочности на сдвиг (относительно предела прочности в плоскости преграды). В материале 2 наоборот: максимальные два предела прочности на растяжение – сжатие в плоскости преграды (по отношению к пределу прочности в направлении нагружения) и только один максимальный предел прочности на сдвиг (относительно двух других пределов прочности на сдвиг). Так как преграда из материала 1 обладает двумя высокими пределами прочности на сдвиг, а преграда из материала 2 — только одним, этим может объясняться большее сопротивление внедрению тяжелых удлиненных ударников преграды из материала 1.

При нагружении ударником той же массы удлиненной формы взаимное расположение кривых торможения сохраняется, но различие в скоростях торможения уменьшается. На рис. 4 представлены зоны разрушения R_s в материале 1 и 2 при растяжении в момент времени 90 мкс при нагружении удлинённым тяжёлым ударником. На рис. 4 видно, что в преграде из материала с минимальными значениями свойств по толщине зона разрушения и пробка с тыльной стороны больше, чем в преграде из материала с максимальными значениями свойств по толщине.

На рис. 5 представлены кривые торможения лёгких удлинённых и компактных ударников при столкновении с преградами из материалов 1 и 2. При нагружении преград лёгкими ударниками (их масса в 10 раз меньше, чем у тяжёлых) получились следующие результаты: кривая 2, соответствующая торможению ударника при столкновении с преградой из материала 2, располагается ниже кривой 1 для всех типов ударников. То есть ударник, сталкиваясь с преградой из материала 2, теряет скорость быстрее, чем при столкновении с преградой из материала 1.

При нагружении удлинённым ударником различие в скоростях ударников появляется только к моменту времени 13 мкс, когда уже заметно сформировалась зона кратера (рис. 5, *а*). В момент времени 23 мкс ударник, сталкивающийся с преградой из материала 2, останавливается, а ударник, сталкивающийся с преградой из материала 1, продолжает внедряться (его скорость при этом равна 25 м/с). Компактный ударник при столкновении с преградой из материала 2 тормозится при 40 мкс, а при столкновении с преградой



а *б*

Рис. 4. Зоны разрушения R_s при растяжении в преграде из материала 1 (*а*) и материала 2 (*б*) в момент времени 90 мкс при $v_0 = 300$ м/с из материала 1 его скорость в момент времени 40 мкс ещё равна 20,3 м/с (рис. 5, *б*).

При нагружении лёгкими ударниками были получены обратные результаты: преграда из материала 2 оказалась жёстче, чем преграда из материала 1. При нагружении лёгкими ударниками, как и при нагружении удлинённым тяжёлым ударником, площадь контакта маленькая и боковые волны разгрузки приходят быстрее. Поэтому в материале 2 быстрее происходит снижение напряжений. Преграда из материала с минимальными значениями свойств в направлении удара (материал 2) оказывает большее сопротивление внедрению ударника, чем преграда из материала с максимальными значениями свойств в направлении удара (материал 1).

На рис. 6 представлены зоны разрушения R_s, образующиеся при растяжении в материалах 1 и 2 при нагружении удлинённым лёгким ударником в момент времени 25 мкс. В материале 1 область разрушения у́же, чем в материале 2, и она распространяется в преграде на большую глубину под ударником.

В материале 2, значения механических свойств которого в направлении удара ниже, чем в плоскости преграды, зона разрушения в большей степени локализуется вокруг ударника: в зоне кратера образуются значительные «выплески» вокруг ударника, и область разрушения при растяжении шире, чем

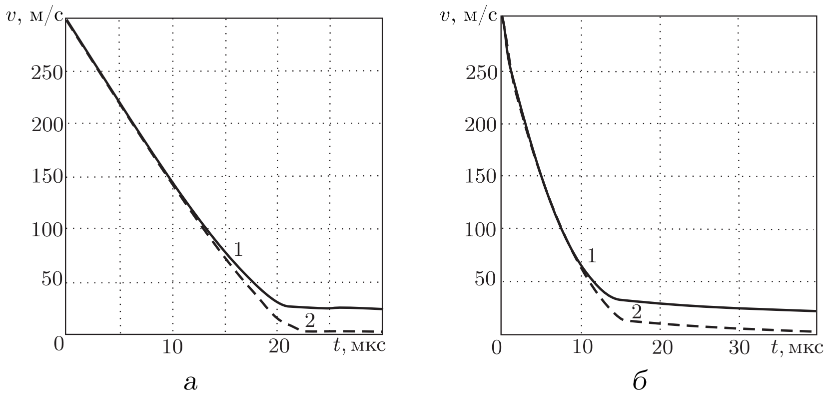


Рис. 5. Кривые торможения легких ударников при столкновении с преградами из материалов 1 и 2: *а*) удлинённый ударник ($d = 4{,}94$ мм, $h = 14$ мм), *б*) компактный ударник ($d = 7$ мм, $h = 7$ мм)

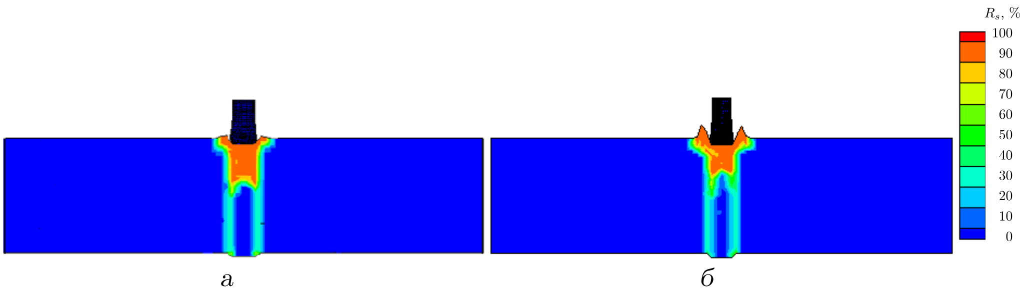


Рис. 6. Зоны разрушения R_s при растяжении в преграде из материала 1 (*а*) и материала 2 (*б*) в момент времени 25 мкс при $v_0 = 300$ м/с

в материале с максимальными свойствами в направлении удара (см. рис. 6). Сравнивая рис. 4 и рис. 6, можно заметить, что при нагружении как лёгким, так и тяжёлым удлинённым ударником в материале 2 зона разрушения при растяжении больше, чем в материале 1. Однако лёгкий удлинённый ударник, в отличие от тяжёлого удлинённого, тормозится быстрее при взаимодействии с преградой из материала 2, чем при взаимодействии с преградой из материала 1.

Выводы. В зависимости от геометрических и кинематических условий нагружения и, как следствие этого, в зависимости от того, в волнах сжатия или растяжения происходит разрушение материала, анизотропия механических свойств оказывает влияние на процесс деформирования материала:

1) для тяжёлых ударников ($m = 20$ г) соударение с анизотропными преградами, имеющими более высокие значения механических свойств по толщине, приводит к тому, что преграда оказывает большée сопротивление внедрению, чем в случае низких значений; при нагружении тяжёлыми ударниками зона разрушения в волне растяжения распространяется глубже в преграде с минимальными механическими свойствами по толщине;
2) лёгкие ударники ($m = 2$ г) при соударении с преградами из анизотропных материалов с минимальными значениями механических свойств по толщине тормозятся быстрее, чем при соударении с преградами из материалов с максимальными значениями; зона разрушения при растяжении при нагружении лёгкими ударниками распространяется глубже в материале с максимальными значениями механических свойств по толщине, чем в материале с минимальными значениями.

Работа выполнена в соответствии с планом работ по госбюджетному финансированию РАН (проект 3.6.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН) и при частичной поддержке программы Президиума РАН (проект 12.4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Седов Л. И.* Механика сплошных сред. Т. 2. М.: Наука, 1976. 574 с. [*Sedov L. I.* Continuum Mechanics. Vol. 2. Moscow: Nauka, 1976. 574 pp.]
2. *Ильюшин А. А.* Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 271 с. [*Ilyushin A. A.* Plasticity. Foundations of the General Mathematical Theory. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1963. 271 pp.]
3. *Ковальчук Б. И., Косарчук В. В., Лебедев А. А.* Теория пластического течения анизотропных сред. Сообщение 1. Определяющие соотношения // *Пробл. прочности*, 1986. № 4. С. 50–56; англ. пер.: *Kosarchuk V. V., Koval'chuk B. I., Lebedev A. A.* Plastic flow theory for anisotropic media. Report 1. Determining relationships // *Strength of Materials.* Vol. 18, no. 4. Pp. 473–482.
4. *Ковальчук Б. И., Косарчук В. В., Лебедев А. А.* Экспериментальное исследование законов упрочнения начально анизотропных материалов // *Пробл. прочности*, 1982. № 9. С. 3–9; англ. пер.: *Kosarchuk V. V., Koval'chuk B. I., Lebedev A. A.* Experimental investigation of laws governing the hardening of initially anisotropic materials // *Strength of Materials.* Vol. 14, no. 9. Pp. 1157–1164.
5. *Кривошеина М. Н., Конышева И.Ю., Козлова М.А.* Разрушение и упругопластическое деформирование анизотропных материалов при динамическом нагружении // *Механика композиционных материалов и конструкций*, 2006. Т. 12, № 4. С. 502–512. [*Krivosheina M. N., Konysheva I. Yu., Kozlova M. A.* Destruction and elasticoplastic

deformation of anisotropic materials on dynamic loading // *Mekhanika Kompositsionnykh Materialov i Konstruktsii*, 2006. Vol. 12, no. 4. Pp. 502–512].

6. *Johnson G. R.* High Velocity Impact Calculations in Three Dimensions // *J. Appl. Mech.*, 1977. Vol. 44, no. 3, 95. 6 pp.
7. *Козлова М. А.* Упрочнение в анизотропных материалах при динамических нагрузках: Дисс. ... к.ф.-м.н. Томск, 2007. 146 с. [*Kozlova M. A.* Hardening in anisotropic materials under dynamic loads: Ph. D. Thesis (Phys. & Math.). Tomsk, 2007. 146 pp.]

Поступила в редакцию 07/XI/2010;
в окончательном варианте — 07/VI/2011.

MSC: 74K25; 74S05, 37M05

INFLUENCE OF THE DIRECTION OF ROLLING IN THE TARGET MATERIAL ON ITS DESTRUCTION UNDER DYNAMIC LOADS

***E. V. Tuch*[1], *M. N. Krivosheina*[1], *C. V. Kobenko*[2]**

[1] Institute of Strength Physics and Materials Science,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
2/4, pr-t Akademicheskiy, Tomsk, 634021, Russia.
[2] Nizhnevartovsk State Humanitarian University,
56, Lenin st., Nizhnevartovsk, 628605, Russia.

E-mails: elenatuch@yandex.ru, marina_nkr@mail.ru, sergeyvk@inbox.ru

In the work, the comparative analysis of elasticoplastic deformation and fracture of target materials with different directions of rolling relating to the direction of target loading was conducted. The dynamic loading of materials targets, characterized by the initial anisotropy of mechanical properties as the result of rolling was simulated numerically, in the three-dimensional formulation. The modeling was performed using the finite element method.

Key words: *numerical simulation, fracture, dynamic loading, anisotropy, metals.*

Original article submitted 07/XI/2010;
revision submitted 07/VI/2011.

Elena V. Tuch, Postgraduate Student, Lab. of Physics of Nonlinear Media. *Marina N. Krivosheina* (Ph. D. (Phys. & Math.)), Senior Researcher, Lab. of Physics of Nonlinear Media. *Sergey V. Kobenko* (Ph. D. (Phys. & Math.)), Associate Professor, Dept. of Informatics and its Methods of Teaching.