

УДК 539.3; 539.42

## ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ МОНОЛИТНЫХ И РАЗНЕСЕННЫХ ПРЕГРАД

А.В. Радченко<sup>1</sup>, П.А. Радченко<sup>2</sup><sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

Рассматривается задача нормального взаимодействия алюминиевого изотропного компактного цилиндрического ударника с ортотропными монолитными и разнесенными (состоящими из двух и трех пластин) преградами в диапазоне скоростей удара от 750 до 3000 м/с. Суммарная толщина пластин в разнесенной преграде равняется толщине монолитной преграды. Исследуется разрушение монолитных и разнесенных преград, сравнивается эффективность их защитных свойств в зависимости от ориентации упругих и прочностных свойств анизотропного материала. Задача решается в трехмерной постановке численно, методом конечных элементов. Поведению материала ударника соответствует упругопластическая модель, поведению анизотропного материала преграды – упруго-хрупкая модель.

*Ключевые слова:* анизотропия, прочность, упругость, разрушение, численное моделирование

## INFLUENCE OF ORIENTATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS ON DYNAMIC FRACTURE OF MONOLITHIC AND SPACED TARGETS

A. V. Radchenko<sup>1</sup> and P. A. Radchenko<sup>2</sup><sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

The problem of normal interaction of the aluminum isotropic compact cylindrical projectile with orthotropic monolithic and spaced targets consisting of two and three plates in a range of load velocities from 750m/s to 3000m/s is considered. The total thickness of plates in the spaced target is equal to the thickness of the monolithic target. Fracture of the monolithic and spaced targets is investigated, and the comparative analysis of the efficiency of their protective properties depending on orientation of the elastic and strength properties of an anisotropic material is carried out. The problem is solved numerically in a three-dimensional statement using the finite element method. The behavior of the projectile material is described by an elastic-plastic model, and the behavior of an anisotropic material of the target is described by an elastic-fragile model.

*Key words:* anisotropy, strength, elasticity, fracture, numerical modeling

### 1. Введение

Создание материалов с заданными свойствами является актуальной задачей, а современные технологии позволяют не только создавать такие материалы, но и оптимизировать параметры конструкции, например прочность, для работы при определенных режимах внешних воздействий. Такая оптимизация может быть произведена благодаря либо армированию материала упрочняющими элементами, либо сообщению его структуре упорядоченности. В композиционном материале компоненты образуют макроскопически многофазную среду, обладающую такими физическими свойствами, которые не характерны для каждого из компонентов по отдельности. Материал композиции, как правило, приобретает высокую степень анизотропии. Но, к сожалению, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в технологиях

получения материалов с заданными свойствами, исследований, посвященных средам с преимущественной ориентацией физико-механических свойств, крайне мало. Особенно это касается данных о поведении композитов при динамических нагрузках. Это относится и к экспериментальным исследованиям, и к математическому и численному моделированию.

Анализ поведения композиционных материалов проводится, как правило, с использованием инженерных методик [1] и позволяет получать приближенные интегральные оценки параметров для условий, допускающих понижение на единицу размерности задачи (при исследовании анизотропных материалов решается, как правило, трехмерная задача). В результате чаще всего рассматриваются осесимметричные воздействия на транслопный материал, а такие ключевые факторы как динамика разрушения, поведение материалов с различной симметрией свойств, эволюция волновых процессов, влияние ориентации свойств, которые могут стать определяющими при динамических процессах, остаются за рамками подобных методик. Важной особенностью анизотропных материалов является также зависимость их прочности от гидростатического давления, и этот факт должен учитываться при моделировании. Среди работ, в которых исследуется поведение анизотропных материалов в осесимметричной или трехмерной постановке, можно отметить работы [2–4].

Применение анизотропных материалов в конструкциях, испытывающих ударно-волновые нагрузки, позволяет повышать их эксплуатационные характеристики за счет оптимальной ориентации упругих и прочностных свойств материала по отношению к внешнему воздействию [5, 6]. Помимо оптимизации свойств материала используются различные подходы, связанные с архитектурными решениями той или иной конструкции. Например, для защиты конструкций от ударного воздействия широко используются разнесенные (экранированные) преграды. Особенно эффективны такие преграды для защиты от влияния высокоскоростных объектов [7, 8].

В данной работе проводится сравнительный анализ развития разрушений в монолитных и разнесенных преградах при высокоскоростном взаимодействии с компактными ударниками. Материалом преград является ортотропный органоупругий материал с высокой степенью анизотропии упругих и прочностных свойств. Исследуется разрушение, эффективность защитных свойств монолитной и разнесенной преград в зависимости от ориентации свойств анизотропного материала в диапазоне скоростей удара от 750 до 3000 м/с.

## 2. Основные уравнения математической модели

Система уравнений, описывающих нестационарные адиабатные движения сжимаемой среды в декартовой системе координат  $x y z$ , включает уравнения неразрывности, движения и энергии:

$$\dot{\rho} + \operatorname{div} \rho \bar{v} = 0,$$

$$\rho \dot{u} = \sigma_{xx,x} + \sigma_{xy,y} + \sigma_{xz,z}, \quad \rho \dot{v} = \sigma_{yx,x} + \sigma_{yy,y} + \sigma_{yz,z}, \quad \rho \dot{w} = \sigma_{zx,x} + \sigma_{zy,y} + \sigma_{zz,z},$$

$$\dot{E} = \sigma_{ij} e_{ij} / \rho.$$

Здесь  $\rho$  — плотность среды;  $\bar{v}$  — вектор скорости;  $v_x, v_y, v_z$  — компоненты вектора скорости по осям  $x, y, z$  соответственно;  $\sigma_{ij}$  — компоненты симметричного тензора напряжений;  $E$  — удельная внутренняя энергия;  $e_{ij}$  — компоненты симметричного тензора скоростей деформаций. Точка над символом обозначает производную по времени, запятая после символа — производную по соответствующей координате.

Поведение алюминиевого изотропного цилиндра, играющего роль ударника при высокоскоростном ударе, задается уравнениями упругопластической среды, в которых

связь между компонентами тензора скоростей деформации и компонентами дивергента напряжений определяется соотношениями Прандтля–Рейса [9, 10]:

$$2G \left( e_{ij} - \frac{1}{3} e_{kk} \delta_{ij} \right) = \frac{DS^{ij}}{Dt} + \lambda S^{ij} \quad (\lambda \geq 0), \quad \frac{DS^{ij}}{Dt} = \frac{dS^{ij}}{dt} - S^{ik} \omega_{jk} - S^{jk} \omega_{ik},$$

где  $\omega_{ij} = (\nabla_i v_j - \nabla_j v_i)/2$ ,  $G$  — модуль сдвига,  $\lambda$  — параметр, который определяется с помощью условия Мизеса:  $S^{ij} S_{ij} = 2\sigma_d^2/3$ , при этом  $\sigma_d$  — динамический предел текучести (при упругой деформации  $\lambda = 0$ , а при пластической  $\lambda > 0$ ). Шаровая часть тензора напряжений (давление)  $P$  рассчитывается по уравнению Ми–Грюнайзена как функция удельной внутренней энергии  $E$  и плотности  $\rho$ :

$$P = \sum_{n=1}^3 K_n (V_0/V - 1)^n (1 - K_0 (V_0/V - 1))/2 + K_0 \rho E,$$

где  $K_0, K_1, K_2, K_3$  — константы материала,  $V_0$  и  $V$  — начальный и текущий удельные объёмы материала соответственно.

Поведение анизотропного материала преград не выходит за рамки упруго-хрупкой модели [5, 10]. Компоненты тензора напряжений в материале преграды до момента разрушения удовлетворяют соотношениям обобщенного закона Гука, записанного в терминах скоростей деформаций:

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} e_{kl},$$

где  $C_{ijkl}$  — упругие постоянные. При этом компоненты тензора упругих постоянных, в силу симметрии тензоров напряжений и деформаций и наличия упругого потенциала, обладают следующими свойствами симметрии:  $C_{ijkl} = C_{jikl} = C_{ijlk} = C_{ijlk}$ ,  $C_{ijkl} = C_{klij}$ . При переходе к другой, также ортогональной, системе координат постоянные преобразуются по формулам:  $C'_{abcd} = C_{ijkl} q_{ia} q_{jb} q_{kc} q_{ld}$ , где  $q_{ij}$  — косинус угла между соответствующими осями  $i$  и  $j$ .

Согласно упруго-хрупкой модели [5, 10] критерием разрушения анизотропного материала служит критерий Ву [11], имеющий различные пределы прочности на сжатие и растяжение. Этот критерий, выраженный через скалярные функции компонент тензора напряжений, имеет вид:

$$f(\sigma_{ij}) = F_{ij} \sigma_{ij} + F_{ijkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} + \dots = 1 \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3). \quad (1)$$

Здесь  $F_{ij}$  и  $F_{ijkl}$  являются компонентами тензоров 2-го и 4-го рангов соответственно и подчиняются законам преобразования:  $F'_{ab} = F_{ij} q_{ia} q_{jb}$ ,  $F'_{abcd} = F_{ijkl} q_{ia} q_{jb} q_{kc} q_{ld}$ .

Компоненты тензоров прочности для критерия (1) находятся из соотношений:  $F_{ii} = 1/X_{ii} - 1/X'_{ii}$ ,  $F_{iiii} = 1/X_{ii} X'_{ii}$ ,  $F_{ij} = (1/X_{ij} - 1/X'_{ij})/2$ ,  $F_{ijij} = 1/4 X_{ij} X'_{ij}$  при  $i \neq j$ , где  $X_{ii}$ ,  $X'_{ii}$  — пределы прочности на растяжение и сжатие в направлении  $i$ ;  $X_{ij}$ ,  $X'_{ij}$  — пределы прочности на сдвиг в двух противоположных направлениях при  $i \neq j$ . Коэффициенты  $F_{1122}$ ,  $F_{2233}$ ,  $F_{3311}$  находятся из экспериментов на двухосное растяжение в плоскостях 1–2, 2–3, 1–3 соответственно. Оставшиеся коэффициенты определяются из опытов при комбинированном нагружении в соответствующих плоскостях.

Предполагается, что разрушение анизотропных материалов в условиях интенсивных динамических нагрузок происходит следующим образом [5, 10]: если критерий прочности (1) нарушается в условиях сжатия ( $e_{kk} \leq 0$ ), то материал теряет анизотропные свойства, а его поведение отвечает гидродинамической модели; при этом материал сохраняет прочность только на сжатие, а тензор напряжений становится в этом

случае шаровым ( $\sigma_{ij} = -P$ ); если критерий (1) нарушается в условиях растяжения ( $e_{kk} > 0$ ), то материал считается полностью разрушенным, и компоненты тензора напряжений полагаются равными нулю ( $\sigma_{ij} = 0$ ).

Численное моделирование проводится методом конечных элементов в трехмерной постановке [12]. Расчет контактных границ осуществляется по алгоритму, предложенному в работе [13], основанному на применении законов сохранения количества движения и момента количества движения к узлам контактных поверхностей.

Для проверки адекватности модели динамического поведения органопластика сделано сравнение численных и экспериментальных данных, которое показало их удовлетворительное согласование [14]. Также исследована сходимость численного решения, которая послужила основой для дискретизации областей конечными элементами. При численном моделировании максимальное количество конечных элементов (тетраэдров), на которые далее разбивается расчетная область, составляет  $10^6$ , при этом количество узлов равняется  $1,8 \cdot 10^5$ . В зависимости от начальной скорости и количества преград, на расчет соответствующего начальным данным варианта задачи требуется до  $10^5$  временных шагов.

### 3. Постановка задачи

Рассматривается трехмерная задача высокоскоростного взаимодействия компактного цилиндрического ударника (область  $D_1$ ) с монолитной (область  $D_2$ ) или разнесенными (область  $D_3$ ) преградами (Рис. 1). Ударник имеет высоту 15 мм и диаметр, равный высоте. Толщина монолитной преграды составляет 40 мм, разнесенные преграды состоят либо из двух пластин толщиной 20 мм каждая с расстоянием между ними 5 мм, либо из трех пластин толщиной 13,33 мм каждая и расстоянием между пластинами 3 мм. Суммарная толщина разнесенных пластин равняется толщине монолитной преграды. Материал ударника — изотропный алюминий ( $\rho_0 = 2710 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_d = 310 \text{ МПа}$ ), материал преград — ортотропный органопластик ( $\rho_0 = 1350 \text{ кг/м}^3$ ).

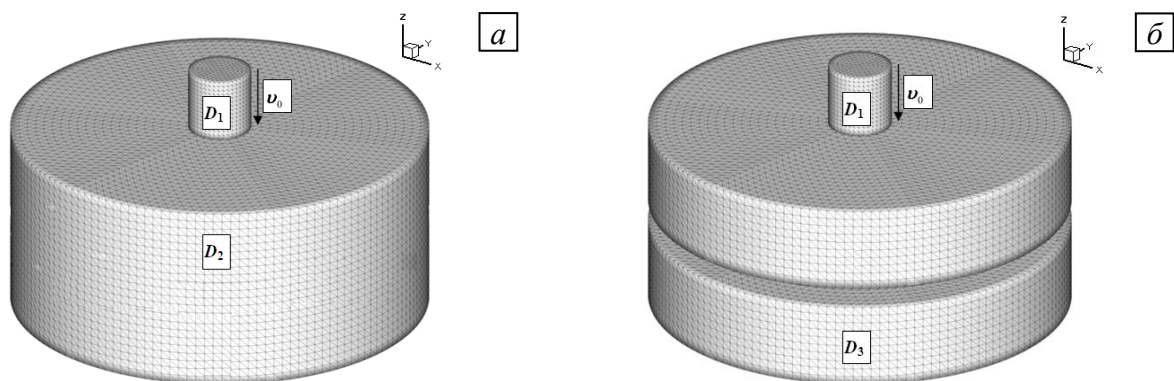


Рис. 1. Расчетная область в случае монолитной (а) и разнесенной (б) преград

Ориентация свойств ортотропного материала изменяется путем поворота осей симметрии исходного материала вокруг оси  $Oy$  на угол  $\beta = 90^\circ$ ; в дальнейшем этот материал будет называться переориентированным. В качестве исходного материала преград ( $\beta = 0^\circ$ ) рассматривается ортотропный органопластик со следующими упругими и прочностными характеристиками [15]:  $E_x = 48,6 \text{ ГПа}$ ,  $E_y = 21,3 \text{ ГПа}$ ,  $E_z = 7,14 \text{ ГПа}$ ,  $c_x = 6000 \text{ м/с}$ ,  $c_y = 3970 \text{ м/с}$ ,  $c_z = 2300 \text{ м/с}$ ,  $\nu_{xy} = 0,28$ ,  $\nu_{yz} = 0,26$ ,  $\nu_{xz} = 0,25$ ,  $\sigma_x^p = 2,67 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma_y^p = 1,18 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma_z^p = 0,39 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma_x^c = 0,37 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma_y^c = 0,5 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma_z^c = 1,94 \text{ ГПа}$ ,

$\tau_{xy} = 0,975$  ГПа,  $\tau_{yz} = 0,8$  ГПа,  $\tau_{xz} = 0,607$  ГПа. Здесь  $E_x, E_y, E_z$  и  $c_x, c_y, c_z$  — модули упругости и скорости звука в соответствующих направлениях;  $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$  — коэффициенты Пуассона;  $\sigma_x^p, \sigma_x^c, \tau_{xy}$  — прочностные параметры на растяжение, сжатие и сдвиг. Исследуется диапазон начальных скоростей ударника от 750 до 3000 м/с. Угол встречи (угол между нормалью к преграде и продольной осью ударника) составляет  $\alpha = 0^\circ$  (нормальный удар).

На свободных поверхностях ударника и преград выполняются условия отсутствия напряжений  $\bar{T}_{nn} = \bar{T}_{ns} = \bar{T}_{nt} = 0$ , на контактных поверхностях ударника и преграды и между пластинами разнесенной преграды реализуются условия скольжения без трения  $\bar{T}_{nn}^+ = \bar{T}_{nn}^-, \bar{T}_{nt}^+ = \bar{T}_{nt}^- = \bar{T}_{ns}^+ = \bar{T}_{ns}^- = 0, \bar{v}_n^+ = \bar{v}_n^-$ . Здесь  $\bar{n}$  — единичный вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке;  $\bar{\tau}$  и  $\bar{s}$  — единичные векторы, касательные к поверхности в этой точке;  $\bar{T}_n$  — вектор силы на площадке с нормалью  $\bar{n}$ ;  $\bar{v}$  — вектор скорости. Нижние индексы у векторов  $\bar{T}_n$  и  $\bar{v}$  обозначают проекции на соответствующие векторы базиса; знак «+» указывает на соответствие значений параметров материала верхней границе контактной поверхности, знак «-» — нижней границе.

#### 4. Обсуждение результатов

При высокоскоростном ударе по разнесенным (экранированным) конструкциям определяющую роль в разрушении как ударника, так и преград играют ударно-волновые процессы. Именно в результате развития этих процессов происходит разрушение как ударника, так и тонких экранов, защищающих основную конструкцию.

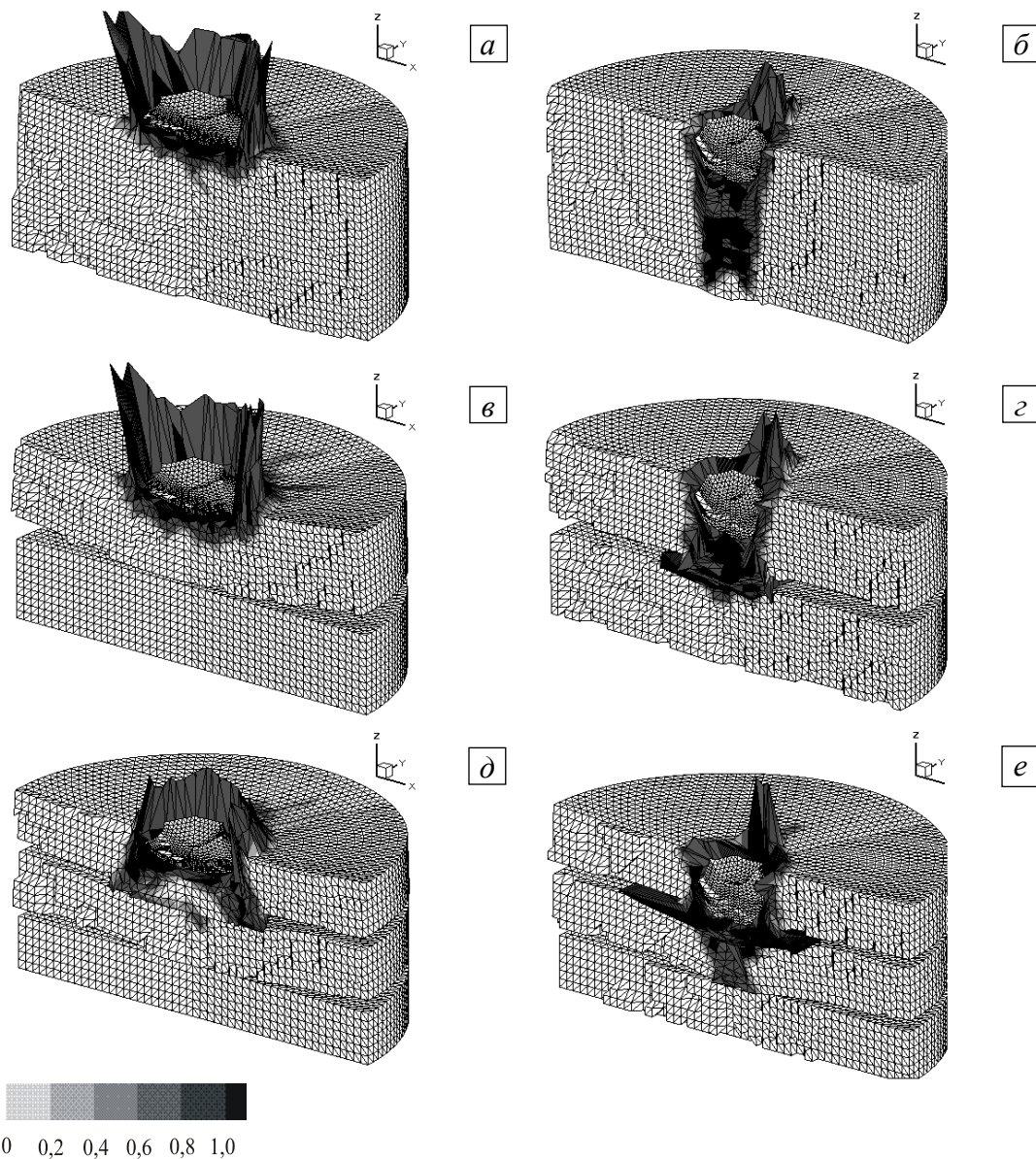
**З а м е ч а н и е.** Тонкие экраны эффективны для защиты космических аппаратов от частиц космического мусора небольших размеров, движущихся со скоростями более 3 км/с, при которых начинается интенсивное разрушение самих частиц. При взаимодействии с более массивными частицами, имеющими скорости до 3 км/с, тонкие экраны уже не эффективны. В космосе подобные ситуации возможны при взаимодействии аппаратов с космическим мусором на догоняющих курсах. При скоростях удара в диапазоне до 3 км/с важную роль играют прочностные характеристики материалов. Ранее проведенные исследования разрушения разнесенных преград из изотропных металлических материалов показали, что их эффективность, по сравнению с эффективностью монолитной преграды, возрастает с увеличением скорости взаимодействия [16]. В настоящее время для изготовления элементов летательных аппаратов используются различные композиционные материалы, обладающие высокой степенью анизотропии упругих и прочностных свойств, и без учета такой особенности, как анизотропия, невозможно адекватно описать и предсказать поведение как отдельных элементов, так и конструкции в целом.

Рисунки 2 и 3 содержат расчетные конфигурации алюминиевого ударника, монолитной преграды, а также двухслойной и трехслойной разнесенных преград из анизотропного органопластика для скоростей удара 750 м/с и 2000 м/с соответственно. На рисунках 2, 3, а, в, д представлены преграды из исходного материала, а на рисунках 2, 3, б, г, е — из переориентированного. Градациями серого цвета показаны значения относительного объема разрушений  $V_p/V_{об}$  в преградах. Следует пояснить, что значения  $V_p$  и  $V_{об}$  приводятся к узлам расчетной сетки:  $V_p$  — это объем соединяющихся в узле элементов, в которых выполнилось условие разрушения (1);  $V_{об}$  — общий объем элементов, содержащих данный узел. Значение  $V_p/V_{об} = 1$  соответствует полному разрушению материала в узле расчетной сетки. Как показали исследования [17, 18],

картина разрушения, наблюдаемая в преградах, зависит от ориентации свойств материала по отношению к направлению действия внешней нагрузки, в данном случае — к направлению удара. В итоге динамический характер разрушений в преграде и определяет эффективность её защитных свойств.

Разрушение материала преград начинается в волне сжатия ( $e_{kk} \leq 0$ ), инициируемой в момент удара. Развитие разрушения в преградах зависит не только от значения прочностных характеристик материала, но и от скоростей распространения волн сжатия и разгрузки.

В преградах из переориентированного материала (Рис. 2, б, з, е, 3, б, з, е), за счет большей скорости продвижения волн в направлении удара (вдоль оси  $z$ ) и меньшего значения предела прочности на сжатие в этом направлении, разрушение, происходящее в волне сжатия, проникает на большую глубину по толщине преграды. Волны разгрузки, движущиеся со стороны свободных поверхностей, достигая областей, где материал был уже ослаблен при сжатии, полностью разрушают его. В этом случае ударник имеет перед собой протяженную область разрушенного материала, не оказывающего сопротивления внедрению ударника ( $\sigma_{ij} = 0$ ).



**Рис. 2.** Конфигурация ударника и монолитной (а, б), двухслойной (в, з) и трехслойной (д, е) преград из исходного (а, в, д) и переориентированного (б, з, е) материалов в момент времени  $t = 30$  мкс при скорости удара 750 м/с

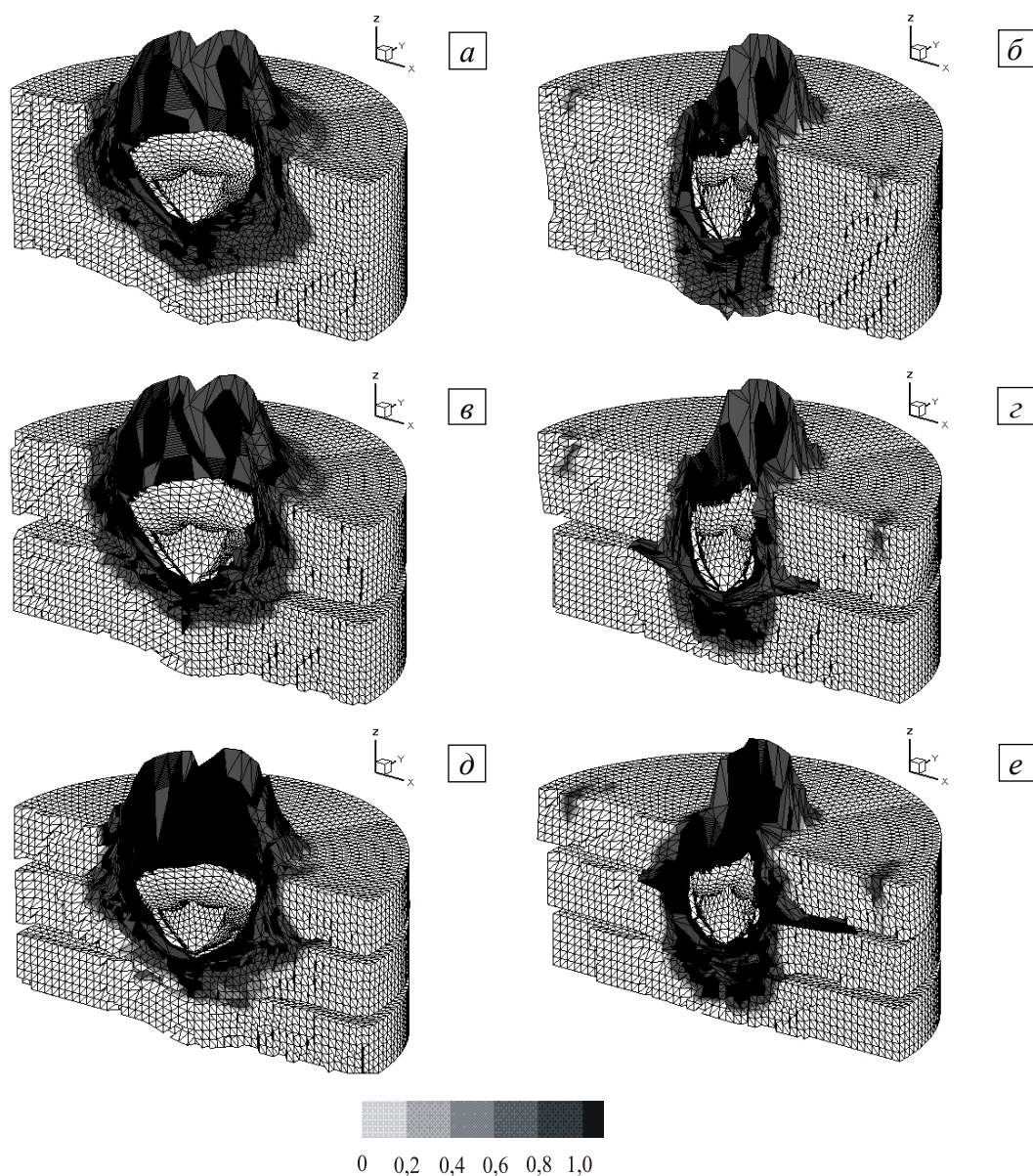
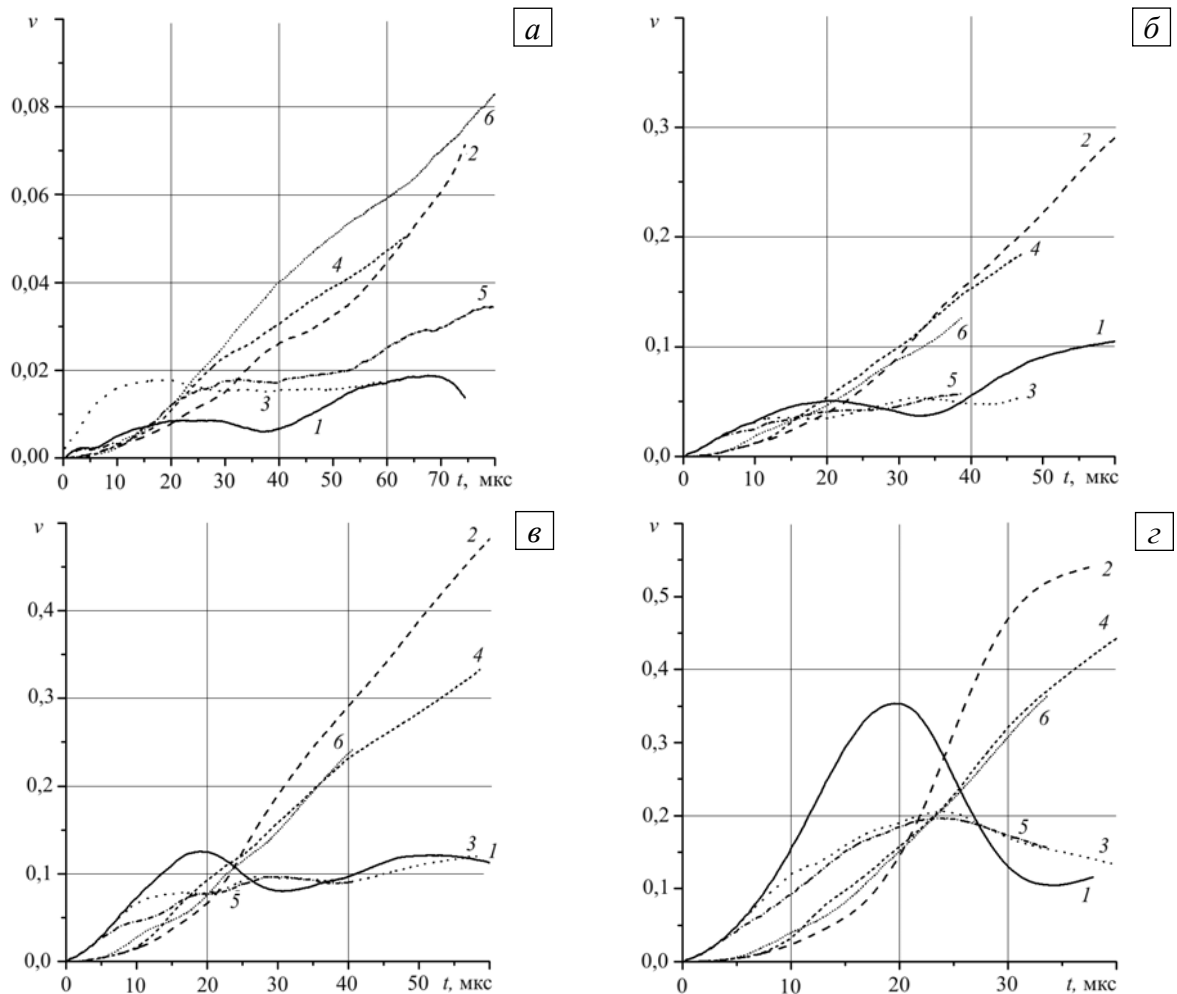


Рис. 3. Конфигурация взаимодействующих тел при  $t=30$  мкс и скорости удара 2000 м/с

В преградах из исходного материала (Рис. 2, *a, в, д, 3, a, в, д*) картина иная: области разрушения, реализующиеся в волне сжатия, имеют более протяженные размеры в направлениях, перпендикулярных направлению удара. Перед ударником сохраняется область неразрушенного материала, обеспечивающая большее сопротивление внедрению ударника.

Оценить интегрально динамику разрушения в преградах позволяет рисунок 4, который показывает изменения во времени суммарного (по преграде) относительного объема разрушений при сжатии или растяжении  $\nu$  ( $\nu = \sum V_p / V_{np}$ ,  $V_{np}$  — общий объем преграды) для различных начальных скоростей удара. Кривые 1, 3, 5 характеризуют изменение во времени относительного объема материала, разрушенного в условиях сжатия (при  $e_{kk} \leq 0$ ) и сохраняющего сопротивление нагружению только на сжатие, для монолитной и разнесенной (двух- или трехслойной) преград. Кривые 2, 4, 6 характеризуют изменение во времени относительного объема полностью разрушенного материала (при  $e_{kk} > 0$ ), не оказывающего сопротивления нагружению ( $\sigma_{ij} = 0$ ). Так как разрушение материала начинается в волне сжатия, то в начале процесса объем

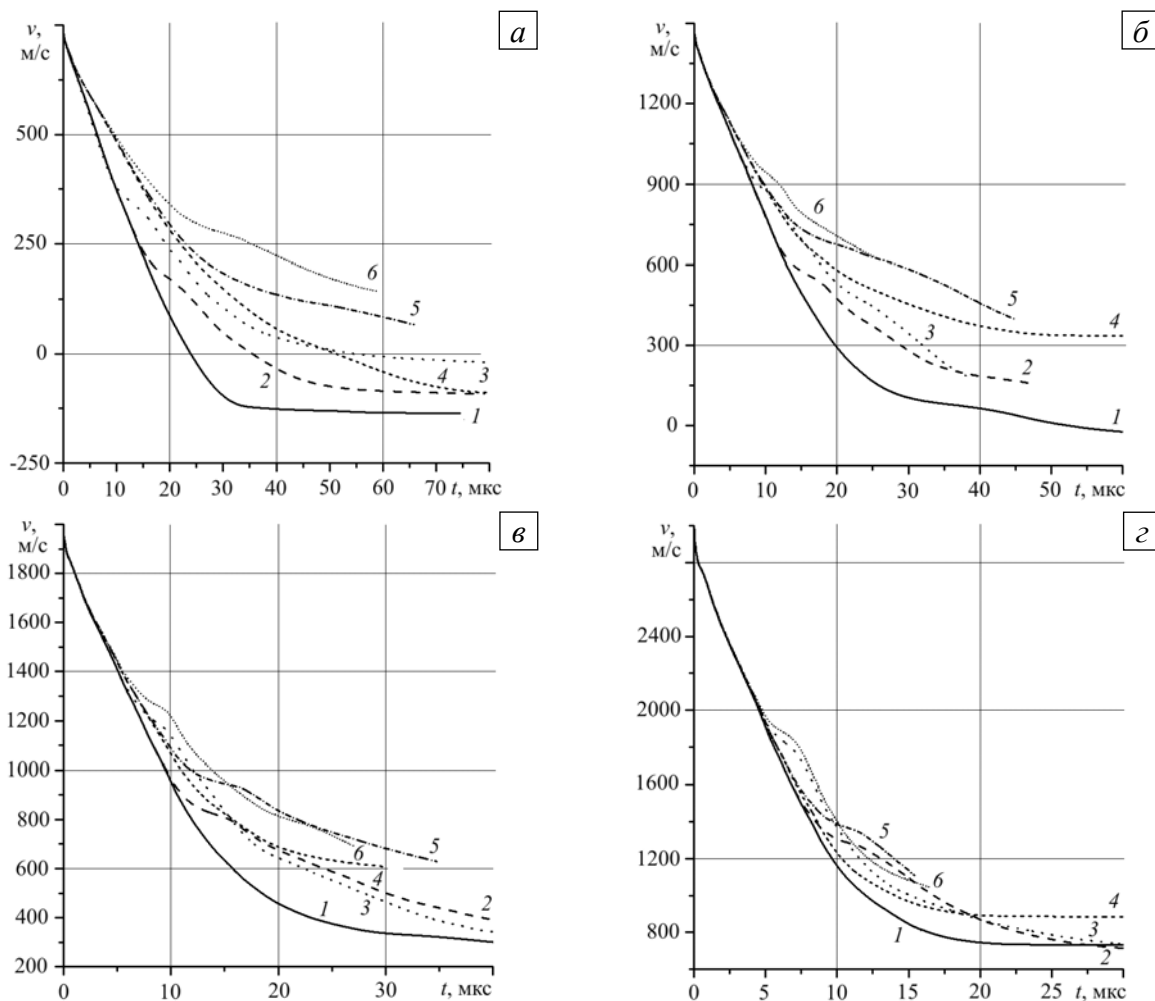


**Рис. 4.** Изменение относительного объема разрушения при начальных скоростях удара 750 м/с (а); 1500 м/с (б); 2000 м/с (в); 3000 м/с (г), различных видах нагружения и разной архитектуре преград: монолитная преграда, сжатие (кривая 1) и растяжение (2); 2-слойная преграда, сжатие (3) и растяжение (4); 3-слойная преграда, сжатие (5) и растяжение (6)

разрушенного материала, находящегося в состоянии сжатия, больше, чем объем разрушенного материала при растяжении. С течением времени объем материала, разрушенного при растяжении, возрастает при одновременном уменьшении объема материала разрушенного при сжатии. Это обусловлено влиянием волн разгрузки, распространяющихся со стороны свободных поверхностей ударника и преград. Если для скорости удара 750 м/с объем полностью разрушенного материала (при  $e_{kk} > 0$ ) в монолитной преграде был наименьшим (кривая 1), то с увеличением скорости удара картина меняется — объем разрушенного материала в монолитной преграде начинает превышать соответствующие значения для разнесенных преград (кривые 2 и 3).

Сравнительный анализ защитных свойств монолитных и разнесенных преград из исходного материала можно провести аналогично по зависимостям скорости центра масс ударника от времени, приведенным на рисунке 5 для различных ориентаций свойств материала. Для исходной ориентации свойств материала при скоростях удара до 2000 м/с более интенсивное торможение ударника наблюдается на монолитной преграде (Рис. 5, а–в). Причем при скорости 750 м/с отсутствует сквозное пробитие как монолитной, так и разнесенных преград. В этом случае в течение всего процесса взаимодействия скорость ударника также падает быстрее при контакте с монолитной преградой. Следующей по эффективности является разнесенная преграда из двух пластин, и наименее эффективной оказывается преграда из трех пластин.





**Рис. 5.** Изменение скорости центра масс ударника с течением времени при начальных скоростях удара 750 м/с (а); 1500 м/с (б); 2000 м/с (в); 3000 м/с (г) для материала с исходной ориентацией свойств ( $\beta = 0^\circ$ ) – кривые 1, 2, 3 и переориентированного материала ( $\beta = 90^\circ$ ) – кривые 4, 5, 6; кривые 1 и 4 отвечают монолитной, кривые 2 и 5 – 2-слойной, кривые 3 и 6 – 3-слойной преграде

С увеличением начальной скорости удара картина меняется. При скорости 1500 м/с эффективнее по-прежнему оказывается монолитная преграда — торможение ударника на ней происходит быстрее. Запреградная скорость ударника после пробития монолитной преграды из исходного материала составляет 50 м/с, после пробития разнесенных преград — 150 м/с, но для начальной скорости 1500 м/сек через 36 мкс после начала удара скорости ударника для случаев двух- и трехслойных разнесенных конструкций выравниваются. Увеличение скорости до 3000 м/с приводит к тому, что через 26 мкс после начала процесса ударник начинает тормозиться быстрее на разнесенных преградах, при этом запреградная скорость после пробития монолитной преграды уже на 10–15% выше, чем после пробития разнесенных преград. Для переориентированного материала описанная выше тенденция возрастания эффективности разнесенных конструкций сохраняется — с ростом скорости взаимодействия разница в запреградных скоростях ударника после пробития монолитной и разнесенных преград уменьшается.

## 5. Заключение

Проведен сравнительный анализ эффективности защитных свойств монолитных и разнесенных преград из анизотропных материалов для различных случаев ориентации свойств материала. Установлено, что эффективность разнесенных конструкций возрастает

с увеличением скорости взаимодействия и определяется развитием разрушения в преградах, зависящим от скоростей распространения волн и ориентации упругих и прочностных свойств анизотропного материала по отношению к направлению удара.

## Литература

1. *Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грецуик Л.Б., Курран Д.Р.* Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 296 с.
2. *Anderson Ch.E., Cox P.A., Johnson G.R., Maudlin P.J.* A constitutive formulation for anisotropic materials suitable for wave propagation computer programs-II // *Comp. Mech.* – 1994. – V. 15, N. 3. – P. 201-223.
3. *Hayhurst C.J., Hiermaier S.J., Clegg A.R., Riedel W., Lambert M.* Development of material models for Nextel and Kevlar-epoxy for high pressures and strain rates // *Int. J. Impact Eng.* – 1999. – V. 23, N. 1. – P. 365-376.
4. *De Vuyst T., Vignjevic R., Bourne N.K., Campbell J.* Modelling of spall in an anisotropic aluminium alloy // *Space Debris.* – 2000. – V. 2, N. 4. – P. 225-232.
5. *Радченко А.В., Кобенко С.В.* Зависимость разрушения анизотропного материала от ориентации упругих и прочностных свойств при ударе // *ДАН.* – 2000. – Т. 373, № 4. – С. 479-482.
6. *Радченко А.В., Кривошеина М.Н., Кобенко С.В., Марценюк И.Н.* Влияние анизотропии свойств оболочки на инициирование детонации в твердом топливе при ударных и импульсных нагрузках // *Химическая физика.* – 2001. – Т. 20, № 6. – С. 123-128.
7. *Горельский В.А., Радченко А.В., Хорев И.Е.* Численное исследование упругопластического взаимодействия твердых частиц с составными пластинами // *Прикладная механика.* – 1987. – Т. 23, № 7. – С. 117-120.
8. *Горельский В.А., Радченко А.В., Хорев И.Е.* Кинетические механизмы процесса пробивания двухслойных пластин // *Изв. АН СССР. МТТ.* – 1988. – Т. 3, № 7. – С. 185-189.
9. *Уилкинс М.Л.* Расчет упруго-пластических течений // *Вычислительные методы в гидродинамике.* – М.: Мир, 1967. – С. 212-263.
10. *Радченко А.В.* Моделирование поведения анизотропных материалов при ударе // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 1998. – Т. 4, № 4. – С. 51-61.
11. *Ву Э.М.* Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред // *Механика композиционных материалов / Под ред. А.А. Ильюшина и Б.Е. Победри.* – М.: Мир, 1978. – С. 401-491.
12. *Johnson G.R.* High velocity impact calculations in three dimension // *J. Appl. Mech.* – 1977. – V. 44, N. 1. – P. 95-100.
13. *Johnson G.R.* Three-dimensional analysis of sliding surface during high velocity impact // *J. Appl. Mech.* – 1977. – V. 44, N. 6. – P. 771-773.
14. *Radchenko A.V., Kobenko S.V., Marcenuk I.N., Khorev I.E., Kanel G.I., Fortov V.E.* Research on features of behaviour of isotropic and anisotropic materials under impact // *Int. J. Impact Eng.* – 1999. – V. 23, N. 1, Part 2. – P. 745-756.
15. *Ашкенази Е.К., Ганов Э.В.* Анизотропия конструкционных материалов. Справочник. – Л.: Машиностроение, 1980. – 248 с.
16. *Радченко А.В., Фортвов В.Е., Хорев И.Е.* Физические особенности высокоскоростного взаимодействия удлиненных техногенных осколков с конструкциями // *ДАН.* – 2003. – Т. 389, № 1. – С. 49-54.
17. *Радченко П.А., Радченко А.В.* Численный анализ ударного взаимодействия двух анизотропных тел // *Физ. мезомех.* – 2005. – Т. 8, Спец. выпуск. – С. 45-48.
18. *Радченко П.А., Радченко А.В.* Влияние угла нутации на проникание удлиненных ударников в ортотропную преграду // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 2005. – Т. 11, № 1. – С. 127-135.

Поступила в редакцию 15.03.11

---

### Сведения об авторах

*Радченко Андрей Васильевич*, дфмн, проф., Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ), 634003, Россия, г. Томск, пл. Соляная, д. 2; E-mail: andrey-radchenko@live.ru

*Радченко Павел Андреевич*, кфмн, мнс, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (ИФПМ СО РАН), 634021, Россия, г. Томск, пр. Академический, д. 2/4; E-mail: radchenko@live.ru