На правах рукописи

Кобенко Сергей Викторович

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ТЕЛ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск - 2003 г.

Работа выполнена в отделе структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН и очной аспирантуре Томского университета систем управления и радиоэлектроники

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
с.н.с. Радченко А.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Макаров П.В.

доктор физико-математических наук,
профессор Югов Н.Т.

Ведущая организация: Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.

Защита состоится “ 28 ” ноября 2003 года в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 в Томском государственном университете, 634050,Томск, пр. Ленина, 36, в ауд. 503 (корпус НИИ ПММ при ТГУ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан “ 28 ” октября 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Христенко Ю.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время анизотропные материалы широко используются в различных конструкциях, испытывающих динамические нагрузки, таких как авиационное и космическое оборудование и в других областях техники. Развитие и совершенствование технологий создания материалов с заданными свойствами еще более расширило применение таких материалов. Особенно это относится к конструкциям, эффективное функционирование которых возможно только при оптимизации их элементов по многим параметрам. Достижение этого невозможно без использования материалов с преимущественной ориентацией физико-механических свойств. В то же время информация о свойствах таких материалов при динамических нагрузках весьма ограничена. Как в России, так и за рубежом полученные результаты об особенностях поведения анизотропных материалов касаются в основном статических нагрузок, разрушение анизотропных материалов при динамических нагрузках моделируется путем образования и развития трещин или рассматривается как процесс накопления микроразрушений. Следует отметить, что в большинстве современных работ оси координат совпадают с главными осями симметрии материала. Существующие инженерные методики, основанные на упрощенных подходах, не позволяют проследить за динамикой разрушения анизотропных материалов и влияния на этот процесс волновых явлений, эволюция которых при ударном воздействии является одним из определяющих факторов. Актуальность исследований поведения анизотропных материалов при ударе определяется потребностью в получении знаний об их свойствах и прогнозированием реакции на динамическую нагрузку элементов конструкций, состоящих из анизотропных материалов.

Цель работы - исследование поведения анизотропных материалов при ударных нагрузках методами численного моделирования. Разработка численной методики для исследования напряженно-деформированного состояния и прогнозирования поведения анизотропных материалов с учетом различных значений пределов прочности на сжатие и растяжение.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика расчета динамики процессов деформирования и разрушения анизотропных материалов в трехмерной постановке с произвольной ориентацией свойств материала, учитывающая различные значения пределов прочности на сжатие и растяжение.
2. Комплекс результатов численного моделирования процесса разрушения пластин из анизотропного органопластика с различной ориентацией свойств материала при нормальном и косом ударе.
3. Сравнительный анализ применимости различных критериев разрушения анизотропных материалов при ударе.
4. Результаты численных исследований напряженно-деформи-рованного состояния заполненных оболочечных конструкций с различными конструктивными элементами при кратковременном импульсном нагружении.

Новизна полученных результатов

1. Создана численная методика, позволяющая проводить исследования свойств широкого класса хрупкоразрушающихся анизотропных материалов с различной степенью анизотропии и симметрией свойств с учетом различных значений пределов прочности на сжатие и растяжение. Реализован алгоритм генерации трехмерной конечноэлементной сетки, обеспечивающий равномерное распределение масс в узлах.
2. Исследовано поведение пластин из анизотропного материала с различными пределами прочности на растяжение и сжатие при ударе. Установлено, что для рассмотренного класса материалов при скоростях удара до 1500 м/с, анизотропия свойств и соотношение значений пределов прочности являются существенными факторами, определяющими эволюцию ударно-волновой картины и характер макроразрушения в пластинах.
3. Проведен сравнительный анализ применимости различных тензорно-полиномиальных критериев разрушения анизотропных материалов при ударе. Установлено, что критерий разрушения Хоффмана второго порядка, содержащий пределы прочности только в направлении осей координат, удовлетворительно описывает только материалы с различными прочностными пределами на сжатие и растяжение. Критерий Ву второго порядка с прочностными характеристиками при комбинированном нагружении, прост для применения, не имеет никаких ограничений, но для определения необходимых констант материала требуются сложные эксперименты. Для критерия Ашкенази, содержащего компоненты тензора напряжений во второй и четвертой степени и пределы прочности в диагональном направлении к осям симметрии материала, наоборот требуются большие вычислительные затраты при достаточно легко получаемых свойствах материала.

Достоверность полученных результатов подтверждается физической обоснованностью применимых моделей среды, корректностью математической постановки задач, сравнением результатов с экспериментальными данными и численными результатами, полученными другими авторами, использованием известных, апробированных численных алгоритмов.

Практическая и теоретическая ценность работы

Полученные в работе результаты дают более глубокие представления о поведении анизотропных материалов. На основе численной методики можно исследовать динамическое поведение широкого класса хруп-

ких анизотропных материалов; проводить компьютерное конструирование перспективных материалов с заданными свойствами для конкретных условий нагружения.

Проведенный сравнительный анализ процессов деформирования и разрушения анизотропных материалов при использовании различных критериев разрушения позволяет выбирать их оптимальное использование.

Публикации

Результаты диссертации представлены в 16 работах, опубликованных в российских и зарубежных научных журналах и сборниках, материалах Всероссийских и Международных конференций.

Апробация работы

Результаты докладывались на 16-ой Межреспубликанской конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности (Новосибирск, 1999г.), V Международном симпозиуме по СВС. (Москва, 1999г.), Международном симпозиуме по высокоскоростному удару (Хантсвилл, США, 1998г.), Всероссийской конференции молодых ученых “Физическая мезомеханика материалов” (Томск, 1999 г.), V Российско-Китайском Международном симпозиуме “Фундаментальные проблемы материаловедения” (Байкальск, 1999г.), Сибирской школе-семинаре “Математические проблемы механики сплошных сред” (Новосибирск, 1999г.), Международной конференции “Математические модели и методы их исследования” (Красноярск, 1999г.), Юбилейной научной конференции, посвященной 40-летию Института механики МГУ “Современные проблемы механики”, (Москва, 1999г.), XV Международной школе по моделям механики сплошной среды им. Акад. Н.Н. Яненко. (С.-Петербург, 2000г.), Всероссийской научной конференции “Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики” (Томск, 2000г.), Международной конференции “Сопряженные задачи механики и экологии” (Томск, 1998, 2000гг.), Международном коллоквиуме по управлению детонационным взрывом (Москва, 2000г.), Международной конференции “Ударные волны в конденсированных средах” (С.-Петербург, 2000г.), 12-ом Симпозиуме по горению и взрыву. (Черноголовка, 2000г.), 6-ой Международной конференции по компьютерному конструированию материалов CADAMT’2001 (Томск, 2001г.), Международном совещании “Мезомеханика: основы и приложения, MESO’2001” (Томск, 2001г.), Международной конференции III Харитоновские тематические научные чтения “Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны” (Саров, 2001), 8-ом Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001г.), 12-ой Международной конференции Американского физического общества “Ударное сжатие конденсированных сред” (Атланта, 2001г.), а также на научных семинарах отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, в котором приведены основные результаты и выводы. Общий объем диссертации 118 страниц (включая 43 рисунка, 7 таблиц, 112 библиографических ссылок и одно приложение).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулирована цель работы, представлены положения, выносимые на защиту и новизна результатов работы. В **первой главе** диссертации приведена физико-математическая постановка задач ударного нагружения. Система уравнений, описывающих непрерывные движения сжимаемой среды в декартовой системе координат (i=1,2,3) включает следующие уравнения:

-уравнение неразрывности $$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \mathrm{div}\rho\bar{\upsilon} = 0 \qquad (1)$$

-уравнения движения $$\rho\frac{\partial\upsilon^k}{\partial t} = \frac{\partial\sigma^{ki}}{\partial x_i} + F^k \qquad (2)$$

-уравнение энергии $$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho}\sigma^{ij}e_{ij}\,. \qquad (3)$$

Здесь ρ - плотность среды; $\bar{\upsilon}$ - вектор скорости; F^k- компоненты вектора массовых сил; σ^{ij} - контравариантные компоненты симметричного тензора напряжений; E - удельная внутренняя энергия; e_{ij} - компоненты симметричного тензора скоростей деформаций. Для описания поведения изотропных металлических материалов использовалась упругопластическая модель. Тензор напряжений представляется в виде суммы девиаторной S^{ki} и шаровой части P:

$$\sigma^{ki} = -P\delta_{ki} + S^{ki} \qquad (4)$$

где δ_{ij} - символ Кронеккера. Давление в материале рассчитывалось по уравнению Ми-Грюнайзена, как функция удельной внутренней энергии и плотности. Предполагая, что для среды справедлив принцип минимума работы истинных напряжений на приращениях пластических деформаций, запишем связь компонент тензора скоростей деформаций и девиатора напряжений в виде:

$$2G\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}\right) = \frac{DS^{ij}}{Dt} + \lambda S^{ij}\,, (\lambda \ge 0). \qquad (5)$$

Здесь $\frac{DS^{ij}}{Dt} = \frac{dS^{ij}}{dt} - S^{ik}\omega_{jk} - S^{jk}\omega_{ik}$, где G - модуль сдвига. Параметр $\lambda=0$ при упругой деформации, а при пластической ($\lambda>0$) определяется с помощью условия Мизеса

$$S^{ij}S_{ij} = \frac{2}{3}\sigma_d^2, \qquad (6)$$

где σ_d – динамический предел текучести.

При описании поведения анизотропного материала использовалась модель хрупко-разрушающегося материала и принимались следующие предположения:

1. Материал является сплошным (сплошной средой);
2. Поперечные размеры структурных (армирующих) элементов малы по сравнению с размерами тела, то есть среда является квазигомогенной;
3. Связь между приращениями компонент тензора напряжений и компонентами тензора скоростей деформаций линейна.

Компоненты тензора напряжений в этом случае определялись из уравнений обобщенного закона Гука. Уравнения, записанные в скоростях деформаций, имеют следующий вид:

$$\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl}e_{kl} \qquad (7)$$

где C_{ijkl} - упругие постоянные, которые выражаются через модули сдвига, модули Юнга и коэффициенты Пуассона. При переходе к другой, также ортогональной, системе координат упругие 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.

Давление в материале рассчитывается по формуле

$$P = \left[\exp\left(4\beta\frac{V_0 - V}{V_0}\right) - 1\right]\frac{\rho_0\alpha^2}{4\beta}, \qquad (8)$$

где ρ_0 - начальная плотность, α и β - коэффициенты ударной адиабаты $D=\alpha+\beta u_m$, u_m - массовая скорость, V_0 и V - начальный и текущий удельные объемы.

Разрушение анизотропного материала описывалось в рамках феноменологического подхода. Если выполнился хотя бы один из критериев разрушения, то полагается, что среда повреждена, т.е. изменились ее прочностные свойства. В областях, где критерий выполняется при сжатии ($e_{kk}\le 0$), считается, что материал теряет свойства анизотропии и для описания такой среды используется модель жидкости, которая сопротивляется объемному сжатию и не сопротивляется сдвигу и растяжению. В областях, где критерий выполняется при растяжении ($e_{kk}>0$) материал считается полностью разрушенным, и компоненты тензора напряжений полагаются равными нулю. В работе используются следующие тензорно-полиномиальные критерии разрушения:

1) Критерий разрушения Цая и Ву, записанный через скалярные функции от компонент тензора напряжений:

$$F_{ij}\sigma_{ij} + F_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl} \ge 1, \quad i, j, k, l = 1, 2, 3. \qquad (9)$$

2) Критерий разрушения, предложенный Хоффманом:

$$\begin{aligned} &C_1(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + C_2(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + C_3(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + \\ &+ C_4\sigma_{11} + C_5\sigma_{22} + C_6\sigma_{33} + C_7\sigma_{12}^2 + C_8\sigma_{23}^2 + C_9\sigma_{31}^2 \ge 1 \end{aligned} \qquad (10)$$

3) Критерий разрушения Ашкенази:

$$\alpha_{ik\ell m}\sigma_{ik}\sigma_{\ell m} - \left[\frac{(\sigma_{ik}\delta_{ik})^2 + \sigma_{ik}\sigma_{ik}}{2}\right]^{\frac{1}{2}} \ge 0. \qquad (11)$$

Для уравнений (1)-(11) ставится задача с начальными при t=0 и заданными на поверхностях граничными условиями. Вектор скорости ударника в начальный момент времени имеет величину υ_0 и его направление совпадает с продольной осью ударника. Косинусы углов между вектором скорости и осями координат равны соответственно l_υ, m_υ, n_υ.

<u>Начальные условия (t=0):</u>

$\sigma^{ij}=P=E=0$ при $(x,y,z)\in D_1\cup D_2$, i, j = x, y, z (12)

$u=\upsilon_0 l_\upsilon$, $v=\upsilon_0 m_\upsilon$, $w=\upsilon_0 n_\upsilon$, при $(x,y,z)\in D_1$ (13)

$u=v=w=0$ при $(x,y,z)\in D_2$ (14)

$\rho=\rho_i$ при $(x,y,z)\in D_i$, i=1,2. (15)

Здесь u, v, w компоненты вектора скорости по осям x, y, z - соответственно.

<u>Граничные условия имеют следующий вид:</u>

на свободных поверхностях Σ_1, Σ_2 выполняются условия

$$T_{nn} = T_{ns} = T_{n\tau} = 0 \qquad \text{при } (x,y,z)\in\Sigma_1\cup\Sigma_2 \qquad (16)$$

на контактных поверхностях реализуются условия скольжения без трения

$$T^{+}_{nn} = T^{-}_{nn}\,,\ T^{+}_{n\tau} = T^{-}_{n\tau} = T^{+}_{ns} = T^{-}_{ns} = 0\,,$$

$$\upsilon^{+}_{n} = \upsilon^{-}_{n} \ \text{ при } (x,y,z)\in\Sigma_3. \qquad (17)$$

Здесь n- единичный вектор нормали к поверхности в рассматриваемой точке, τ и s - единичные векторы, касательные к поверхности в этой точке, T_n - вектор силы на площадке с нормалью n, υ - вектор скорости. Нижние индексы у векторов T_n и υ означают проекции на соответствующие вектора базиса; значок плюс “+”характеризует значение параметров в материале на верхней границе контактной поверхности, значок минус “-” - на нижней. Таким образом, система уравнений (1)-(11) совместно с начальными и граничными условиями (12)-(17) полностью определяет краевую задачу. Для численного решения используется метод конечных элементов.

Во **второй главе** проводится сравнение результатов численных расчетов и экспериментальных данных. Сопоставление проведенного численного расчета задачи о нормальном ударе цилиндрического стального стержня по абсолютно твердой преграде, эксперимента и численного расчета, проделанного Уилкинсом М. Л., показывает хорошее совпадение. Относительная погрешность проведенных расчетов в сравнение с экспериментами не превышает 3%. Для численного тестирования адекватности модели поведения анизотропных материалов при динамических нагрузках было рассмотрено взаимодействие компактного стального ударника массой 20 г с преградой из стеклопластика. В табл. 1 и табл. 2 приведены результаты экспериментов и расчетов для изотропной и транстропной преград, соответственно. В таблицах и далее по тексту введены следующие обозначения: h – толщина преграды, υ_0 – начальная скорость ударника, υ_1 – запреградная скорость ударника, δ_υ - относительное расхождение по запреградной скорости в эксперименте и расчете.

Таблица 1. Данные для изотропной преграды.

h, мм	υ_0, м/с	Эксперимент	Расчет	δ_υ, %
		υ_1, м/с	υ_1, м/с	
5	992	928	870	6.3
9	1163	1013	950	6.2
14	1064	812	780	4.0

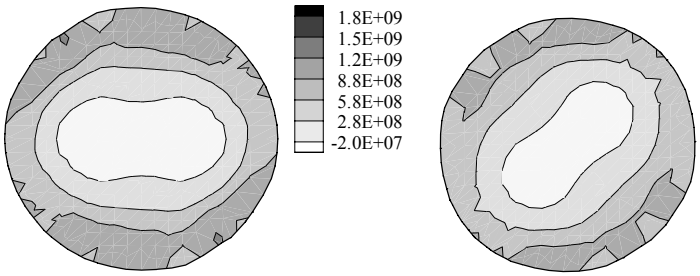
Таблица 2. Данные для анизотропной преграды.

h, мм	υ_0, м/с	Эксперимент	Расчет	δ_υ, %
		υ_1, м/с	υ_1, м/с	
26	1054	698	640	8.3
26	1077	695	638	8.2
18	1012	897	836	6.8
18	956	838	792	5.5

Сравнение численных и экспериментальных результатов позволяет сделать вывод, что предложенная модель удовлетворительно описывает процесс пробития изотропных и транстропных пластин. Отклонения расчетных значений запреградных скоростей от экспериментальных значений не превышает 8.5%.

Для тестирования методики проведены расчеты падения конструкции с исходными данными соответствующими модельному эксперименту, проведенному в ФНПЦ “Алтай”, и сравнение результатов по значениям ширины контактного пятна на левом торце, в середине и правом торце изделия. Рассматривалось падение этого изделия с высоты 5м на жесткое основание. Относительное отклонение результатов расчета и эксперимента составляет 5.3-14.7%. Проведенные расчеты показывают возможность проведения численных экспериментов длительно протекающих процессов с удовлетворительной точностью.

Для более детальной проверки методики и программного комплекса на сходимость при различных размерах сеток, расчетов при различной ориентации свойств материала было рассмотрено поведение ортотропных сферических тел подверженных всестороннему сжатию прямоугольным импульсом давления 1 ГПа в течении 3 мкс. На рис. 1 в момент времени 1 мкс приведено распределение давления в сечении OXZ в исходном материале (а) и в переориентированном материале (б) при отсутствии разрушения. Ориентация свойств материала изменяется путем вращения вокруг оси OY на угол β. Картина распределения давления в переориентированном и в исходном материале аналогичны и отличаются только по направлению, что подтверждает правильность расчетов свойств анизотропного материала при несовпадении осей координат и осей симметрии материала.

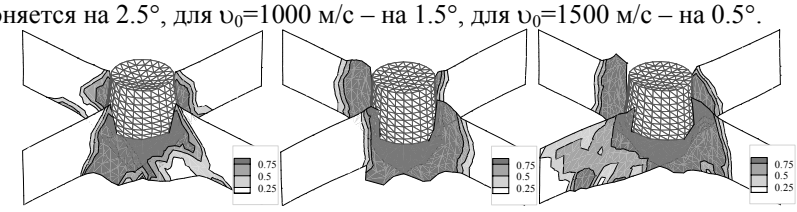


а) β=0° б) β=45°

Рис. 1. Распределение давления. t=1 мкс

Для исследования на сходимость были проведены расчеты на различных сетках (1мм→0.5мм→0.25мм) и с различной ориентацией материала (β=0°, 45°, 90°) с учетом разрушения. При различных ориентациях свойств материала расхождения в значениях доли разрушенного материала находится в пределах 5%, в случае изменения размера ячейки в 4 раза расхождение - не превышает 6%. Представленные расчеты показывают, что численная методика позволяет моделировать поведение анизотропных материалов с различной ориентацией их свойств с достаточной точностью для анализа напряженно-деформированного состояния и прогнозирования разрушения материала.

В **третьей главе** в рамках представленной модели исследуется разрушение и эволюция волновых процессов в ортотропном органопластике при нормальном и косом ударе в зависимости от ориентации его свойств. Для определения разрушения материала использовался тензорно-полиномиальный критерий разрушения Ву второго порядка с различными пределами прочности на сжатие и растяжение. Рассмотрен нормальный удар стальным компактным цилиндром по ортотропной пластине в диапазоне скоростей 700-1500м/с с различной ориентацией материала (0°, 45°, 90°). На рис. 2 приведено распределение изолиний доли разрушенного материала преграды при начальной скорости удара υ_0=700 м/с для случаев ориентации материала с 0°, 45° и 90°. В связи с наибольшим пределом прочности на сжатие в направлении Z для исходного материала, разрушение его не происходит непосредственно в волне сжатия. Зона разрушения в 5 мкс расположена непосредственно под ударником и характерным для данного случая является развитие узкой зоны разрушения-трещины, распространяющейся с лицевой поверхности пластины под углом 45°. В случае ориентации материала с β=90°, прочность в направлении Z на сжатие минимальна, что приводит к сквозному разрушению материала в волне сжатия по толщине пластины. К 5 мкс зона разрушения распространяется на 3/4 толщины преграды и к 10 мкс разрушение достигает тыльной поверхности пластины. При β=45° разрушение материала преграды, подобно предыдущему случаю, происходит в волне сжатия. В связи с ориентацией свойств материала под углом к свободным поверхностям преграды, в данном случае происходит сложный процесс распространения и взаимодействия волн сжатия и разгрузки. К 20 мкс разрушение преграды происходит по всей толщине преграды и достигает боковой поверхности. При этом изменяется направление вектора скорости ударника в сторону наименьшего сопротивления прониканию. Так при начальной скорости удара υ_0=700 м/с вектор скорости ударника отклоняется на 2.5°, для υ_0=1000 м/с – на 1.5°, для υ_0=1500 м/с – на 0.5°.



β=0° β=45° β=90°

Рис. 2. Распределение изолиний. υ_0=700 м/с, t=20 мкс.

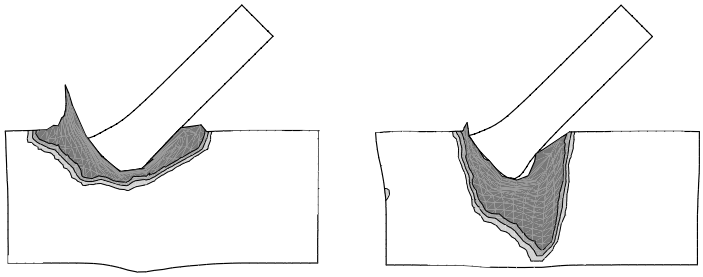
Во всех проделанных расчетах доля разрушенного материала преграды имеет наибольшее значение при β=45° и наименьшее при β=90°. Так в момент времени 25 мкс разница по доли разрушенного материала в сравнении с исходным материалом при υ_0=700 м/с достигает 39% для β=45° и 23% для β=90°, при υ_0=1000 м/с - 17% для β=45° и 20% для β=90°, для υ_0=1500 м/с – 2% для β=45° и 10% для β=90°.

Проведенные исследования показали, что ориентация свойств оказывает существенное влияние на разрушение ортотропного материала. Степень этого влияния уменьшается с увеличением скорости взаимодействия и становится несущественным выше скорости 1500 м/с.

Также было проведено моделирование процесса удара стального стержня по пластине под углом α=45°. Толщина пластины h=30мм, диаметр ударника D=10мм, удлинение λ=L/D=5, величина скорости удара υ_0 =1000м/с и в начальный момент направление вектора скорости совпадает с осью цилиндра.

В целом, качественная картина развития разрушений и протекания волновых процессов в данном случае подобна случаю нормального удара. Но при взаимодействии под углом ширина фронта инициируемой при ударе волны сжатия меньше, чем при нормальном ударе и затухание происходит быстрее. Поэтому область

сжатия в материале существенно сужается по мере удаления от лицевой поверхности преграды. Разрушение материала преграды происходит в волне сжатия и зона разрушенного материала вытянута в направлении минимальной прочности на сжатие. На рис. 3 в сечении XOY приведено распределение изолиний доли разрушенного материала преграды в момент времени 20 мкс для двух случаев ориентации свойств материала Из всех рассмотренных вариантов ориентации материала, к 25 мкс только в материале с β=90° зона разрушения достигает тыльной поверхности пластины. В исходном материале зона разрушения распространяется только на верхнюю половину преграды, а для β=45° и β=135° - на 4/5 толщины пластины. В исходном материале область разрушения является наименьшей в течении всего процесса и к 25 мкс отличие по сравнению с другими составляет от 30% (β=90°) до 48% (β=45°). Наибольшее разрушение происходит в материале при β=45°, что связано с направлением оси материала с минимальной прочностью вдоль оси стержня и его вектора скорости. Анализ изменения во времени компонентов скорости центра масс ударника при взаимодействии под углом, также как и при нормальном ударе, показывает, что наибольшее торможение ударника в направлении Z происходит в исходном материале.



β=0° β=90°

Рис. 3. Распределение изолиний. t=20 мкс.

Для сравнения критериев разрушения, рассмотренных в работе, были проведены расчеты при нормальном и косом ударе. Для расчетов использовался материал с одинаковыми пределами прочности на сжатие и растяжение при применении критериев Ашкенази, Хоффмана и Ву, и с различными пределами - при применении критериев Хоффмана и Ву. Результаты для критерия Хоффмана значительно отличаются от других критериев. При использовании критерия Хоффмана доля разрушенного материала для всех скоростей соударения является наибольшей и процесс разрушения происходит более интенсивно по сравнению с другими критериями. Это объясняется использованием недостаточного количества прочностных характеристик в критерии разрушения Хоффмана. Относительное отклонение скорости центра масс ударника δ_υ и доли разрушенного материала δ_d на момент времени 25 мкс в сравнении с критерием разрушения Ву представлены в табл. 3.

Табл. 3.

Критерии	υ_0=700 м/с		υ_0=1000 м/с		υ_0=1500 м/с	
	δ_d, %	δ_υ, %	δ_d, %	δ_υ, %	δ_d, %	δ_υ, %
Хоффма-	64.1	3.3	28	2.4	21.1	1.4
Ашкена-	3.2	2.9	3.4	1.8	7.3	0.8

В табл. 4 представлены значения величин на момент времени 25 мкс и относительное отклонение их при использовании критерия Ву и Хоффмана с различными прочностными свойствами на растяжение и сжатие. Для всех вариантов расчета отклонение значений представленных величин находится в пределах 10%.

Табл. 4.

Параметр	Критерии		δ, %
	Ву	Хоффмана	
Нормальный удар, υ_0=700 м/с			
V_d/V_0	0.24	0.241	0.5
υ, м/с	426	381	10.5
Нормальный удар, υ_0=1000 м/с			
V_d/V_0	0.332	0.352	6
υ, м/с	679	652	4
Нормальный удар, υ_0=1500 м/с			
V_d/V_0	0.504	0.524	4
υ, м/с	1125	1107	1.6

Удар длинным ударником под углом 45°, υ_0=1000 м/с			
V_d/V_0	0.094	0.103	9.6
υ_x, м/с	651	655	0.6
υ_z, м/с	587	596	1.5

Четвертая глава посвящена анализу напряженно-деформированного состояния и разрушения заполненных оболочечных конструкций двух типов, моделирующих ракетный двигатель на твердом топливе (РДТТ), при действии внешнего импульса давления. Внешний импульс давления в 3 ГПа прикладывался в течении 0.5 мкс: 1) в кольцевой зоне 1/5 длины конструкции; 2) по длине конструкции в секторе 60°; 3) 1/5 длины конструкции в секторе 60°. На рис. 4 в продольном сечении представлено распределение изолиний напряжения σ_z при импульсном нагружении в кольцевой зоне для двух типов конструкций

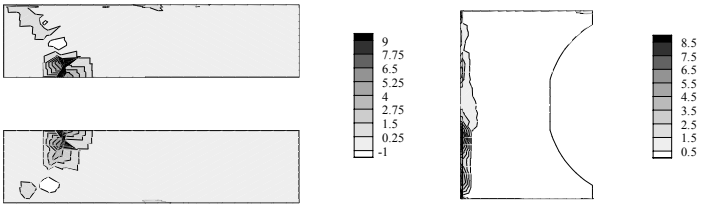


Рис. 4. Распределение изолиний σ_z. t=500 мкс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе разработанной численной методики можно исследовать и прогнозировать динамическое поведение широкого класса хрупких анизотропных материалов с различной симметрией свойств и степенью анизотропии с учетом различных значений пределов прочности на сжатие и растяжение.

Общие выводы по работе заключаются в следующем:

1. Создана численная методика, позволяющая проводить исследования свойств широкого класса хрупкоразрушающихся анизотропных материалов с различной степенью анизотропии и симметрией свойств с учетом различных значений пределов прочности на сжатие и растяжение. Реализован алгоритм генерации трехмерной конечноэлементной сетки, обеспечивающий равномерное распределение масс в узлах. На основе данной методики создан программный комплекс для моделирования процессов ударного нагружения.
2. Исследовано поведение пластин из анизотропного материала с различными пределами прочности на растяжение и сжатие при ударе. Установлено, что для рассмотренного класса материалов при скоростях удара до 1500 м/с, анизотропия свойств и соотношение значений пределов прочности являются существенными факторами, определяющими эволюцию ударно-волновой картины и характер макроразрушения в пластинах.
3. Проведен сравнительный анализ применимости различных тензорно-полиномиальных критериев разрушения анизотропных материалов при ударе. Установлено, что критерий разрушения Хоффмана второго порядка, содержащий пределы прочности только в направлении осей координат, удовлетворительно описывает только материалы с различными прочностными пределами на сжатие и растяжение. Критерий Ву второго порядка с прочностными характеристиками при комбинированном нагружении, прост для применения, не имеет никаких ограничений, но для определения необходимых констант материала требуются сложные эксперименты. Для критерия Ашкенази, содержащего компоненты тензора напряжений во второй и четвертой степени и пределы прочности в диагональном направлении к осям симметрии материала, наоборот требуются большие вычислительные затраты при достаточно легко получаемых свойствах материала.
4. Проведены численные исследования поведения конструкций, моделирующих ступени ракетного двигателя, при ударном нагружении. Установлено, что при воздействии импульсом 3 ГПа в течении 0.5 мкс, детонация твердого топлива не возникает. Разрушение оболочки происходит в зоне действия нагрузки для всех рассмотренных случаев.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кобенко С.В. Численный анализ протекания ударно-волновых процессов в ортотропных материалах // Сопряженные задачи механики и экологии. Материалы международной конференции. 6-10 июля 1998. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1998. С.34
2. Кобенко С.В. Моделирование разрушения анизотропных материалов при ударе // Международная конференция VI Забабахинские научные чтения, 24-28 сентября 2001г. Тезисы. – Снежинск: ВНИИТФ, С. 143.
3. Кобенко С.В. Моделирование разрушения анизотропных материалов при ударно-волновых нагрузках с использованием различных критериев прочности // Proceedings of the International Conference «Shock Waves in Condensed Matter» (SWCM-2002). Saint-Petersburg, 1-6 September, 2002. - St. Petersburg, 2002. P. 35-38.

4. Радченко А.В., Кобенко С.В. Численное моделирование деформирования и разрушения оболочечных конструкций при ударных нагрузках // Механика композиционных материалов и конструкций. - 1999. - Т. 5. - № 1. - С. 3-15.
5. Радченко А.В., Кобенко С.В. Влияние ориентации упругих и прочностных свойств на разрушение ортотропных материалов при ударе // Механика композиционных материалов и конструкций. - 1999. - Т. 5. - № 4. - С. 8-16.
6. Радченко А.В., Кобенко С.В. Зависимость разрушения анизотропного материала от ориентации упругих и прочностных свойств при ударе // Доклады РАН. - 2000. - Т. 373. - № 4. - С. 479-482.
7. 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.
8. Кривошеина М.Н., Радченко А.В., Кобенко С.В. Разрушение ортотропного и изотропного сферических тел под действием импульса всестороннего сжатия // Механика композиционных материалов и конструкций. - 2001. - Т. 7. - № 1. - С. 95-102.
9. Radchenko A.V., Marcenuk I.N., Kobenko S.V. The influence of heterogeneous materials anisotropy properties on their behaviour under dynamic loads // V International Conference "Computer-Aided Design of Advanced Materials and Technologies", August 4-6 1997. Baikal Lake. -Russia. P. 167-168.
10. Radchenko A.V., Krivosheina M.N., Kobenko S.V., Marzenyuk I.N. The Effect of Anisotropy of Shell Properties on Detonation Initiation in Solid Fuel under Impact and Pulse Loads // Control on Detonation Processes /[Edited by G.D. Roy, S.M. Frolov, D.W. Netzer, A.A. Borisov].- Moscow: Elex-KM Publishers, 2000. P.79-82.
11. Кривошеина М.Н., Кобенко С.В., Радченко А.В. Разрушение ортотропной сферы в условиях всестороннего импульсного сжатия // В кн.: Сопряженные задачи механики и экологии. Материалы Международной конференции Томск, 4-9 июля 2000. - изд-во Том. ун-та, 2000. С. 135-136.
12. Radchenko A.V., Kobenko S.V. Dependence of anisotropic material failure on orientation of elastic and strength properties at normal and oblique impact // Int. Conf. “Shock Wave in Condensed Matter” St.-Petersburg, 8-13 October, 2000. - P. 101-105.
13. Радченко А.В., Кривошеина М.Н., Кобенко С.В., Марценюк И.Н. Поведение анизотропных материалов при ударных и импульсных нагрузках // Материалы 12-го Симпозиума по горению и взрыву ”Химическая физика процессов горения и взрыва”. Черноголовка. 11-15 сентября 2000.- 2000. Ч. 2. С. 211-212.
14. Radchenko A.V., Kobenko S.V. Krivosheina M.N. Numerical modeling of the design behaviour from anisotropic materials under impact loads // Proc. VI Int. Conf. Computer-Aided Design of Advanced Materials and Technologies (CADAMT’ 2001), March 29-31. – Tomsk, 2001. P. 83-84.
15. Кобенко С.В., Кривошеина М.Н., Радченко А.В. Моделирование и анализ ударно-волновых процессов в анизотропных материалах // Тр. Восьмого Всеросийского съезда по теоретической и прикладной механике. Пермь. 23-29 августа 2001. - Екатеринбург, 2001. С. 330.
16. Radchenko A.V., Kobenko S.V., Krivosheina M.N. Effect of oriented elastic and strength characteristics on the impact fracture of anisotropic materials // Proc. Int. conf. of the APS Topical Group on "Shock Compression of Condensed Matter", Atlanta, June, 24-29, 2001. / Ed. By M.D. Furnish, N. N. Thadhani and Y. Horie. - AIP Press, 2002. P. 543-546.