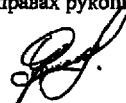


ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Орлов Максим Юрьевич



УДК 539.3

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СТРУКТУРНО –
НЕОДНОРОДНЫХ ПРЕГРАД ПРИ УДАРНОВОЛНОВОМ
НАГРУЖЕНИИ**

Специальность

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико - математических наук

Научный руководитель
к.ф.-м.н., с.н.с.
В.П. Глазырин

Томск 2006

Работа выполнена в НИИ прикладной математики и механики и кафедре теории прочности и проектирования физико-технического факультета Томского государственного университета

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник. Глазырин В.П.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник Трушков В.Г.

доктор физико-математических наук,
профессор Люкшин Б.А.

Ведущая организация:

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск)

Защита состоится «6» октября 2006 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «_» _____ 2006 г.

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

Процессы, протекающие в твердых телах при высокоскоростном взаимодействии являются предметом фундаментальных и прикладных исследований в настоящее время как в России, так и за ее рубежом. Это обусловлено, прежде всего, широтой использования получаемых результатов в различных сферах жизнедеятельности человека.

Однако при количественном описании высокоскоростных ударных явлений возникает много сложных проблем, которые в настоящее время далеки от решения и требуют использования теоретических и экспериментальных методов исследований. Наиболее эффективный и информативный способ моделирования высокоскоростного соударения твердых тел базируется на решении основной системы уравнений механики деформируемого твердого тела. Как правило, для задач удара такая система уравнений с определяющими соотношениями, граничными и начальными условиями, аналитического решения не имеет. Для ее решения используют численные методы. При помощи численных методов можно проследить по времени весь процесс динамического деформирования твердых тел. В ходе численного эксперимента можно определить место и время образования первых очагов разрушения, их характер и эволюцию. Результаты численного моделирования можно использовать для оценки существующих и разработки новых инженерных методик расчета.

Численные исследования процессов, протекающих в твердых телах при ударном и взрывном воздействии, проводились различными коллективами ученых и связаны с именами: В.В. Башурова, Н.Н. Белова, А.В. Герасимова, С.К. Годунова, В.А. Гридневой, А.И. Гулидова, В.Л. Загускина, С.А. Зелегугина, А.И. Корнеева, В.Ф. Куропатенко, Б.А. Люкшина, Р.И. Нигматуллина, П.В. Макарова, Т.М. Платовой, Н.Н. Пилогина, А.В. Радченко, А.И. Рузанова, Г.А. Сапожникова, В.А. Скрипяка, В.Г. Трушкова, В.М. Фомина, Н.Т. Югова, а также M.L. Wilkins, Von Neumann R.J., R.D. Richtmyer, G.R. Johnson, R.A. Stryke, MacCormack R.W., O. Neimark, F. Collombet, R.A. Gingold, P.D. Lax, B. Wendroff и др.

Существующие в настоящее время численные методы, применяющиеся для решения задач пробития и проникания с простой компоновкой и геометрией взаимодействующих тел мало пригодны для моделирования перспективных ударостойких защит, которые, как правило, являются структурно-неоднородными, а именно, наполненными высокопрочной керамикой, армированные вольфрамом или ураном и т.д. В связи с этим в настоящее время существует потребность в создании численного метода, позволяющего моделировать высокоскоростное деформирование и фрагментарное разрушение материала, или другими словами в методе расчете должна быть заложена возможность выделения поверхностей разрыва сплошности материала, а также возможность отслеживать контактные и свободные поверхности как имеющиеся в начальный момент времени, так и образующиеся в процессе деформирования и разрушения. Выполнение этих условий имеет важное значение при решении многоконтактных задач удара.

Целью диссертационной работы является разработка средств математического моделирования и проведения с их помощью численных исследований по выяснению механизмов и основных закономерностей процессов деформирования и разрушения структурно-неоднородных преград при ударноволновом нагружении в широком диапазоне начальных условий.

Научная новизна заключается в том, что на основе предлагаемого подхода разработана новая модификация лагранжевого метода численного моделирования процессов высокоскоростного деформирования и разрушения твердых тел, явно учитывающая фрагментацию и позволяющая моделировать нагружение структурно-неоднородных материалов.

Практическая значимость Созданная методика численного моделирования и программный комплекс могут быть полезны при проведении фундаментальных и прикладных исследований. В плане фундаментальных НИР использование данной методики позволяет выяснять механизмы и закономерности процесса высокоскоростного деформирования и разрушения конструкционных материалов и кроме того получать результаты в недоступной для эксперимента области начальных условий. В плане прикладных исследований, а также при проведении НИОКР методика позволяет прогнозировать поведение перспективных ударостойких защит гражданских и военных объектов и техники, что дает возможность разработчикам проводить комплексное рациональное проектирование и облегчает поиск оптимального варианта защитной конструкции.

Результаты работы внедрены и использованы при выполнении следующих НИР:

- «Создание методов прогнозирования стойкости бронепреград различного состава», шифр «Ибрис», заказчик: Секция прикладных проблем при Президиуме РАН, 1999-2001г;

- «Создание математических методов исследования конструкционных материалов при ударных и взрывных нагрузках». Код НИР: 03.01.015. межотраслевая программа Министерства образования РФ и Министерства обороны РФ «Научно-инновационное сотрудничество», 2001-2002г;

- «Исследование деформирования и разрушения материалов конструкций в условиях интенсивного нагружения» № гос. регистрации 01.200.1 12393, УДК 532.546, 2001-2005г.

Диссертационная работа выполнялась при частичном финансировании по программе Минобразования РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2006-2008 годы) (проект РНП 2.1.2.2398)» и частичной поддержке грантов РФФИ (код проекта № 05-08-01196а и № 06-08-00903а).

Достоверность результатов численного моделирования подтверждена и установлена корректностью физико-математической постановки и решением ряда тестовых задач, результаты которых сравнивались с аналитическим решением Ренкина – Гюгонно и экспериментальными данными. Рассмотрены задачи об ударе цилиндра по жесткой стенке, о пробитии сферическим ударником однородных и двухслойных преград и о глубоком внедрении ударника с оживальной головной частью в полубесконечные преграды.

Положения, выносимые на защиту.

1. Модификация лагранжевого метода, в явном виде учитывающая фрагментарное разрушение структурно-неоднородных материалов по отрывному и сдвиговому типу при ударном нагружении.
2. Методика численного моделирования, позволяющая исследовать процессы высокоскоростного деформирования и разрушения материалов, в том числе глубокого внедрения ударников и сквозного пробития преград с возможностью выделения поверхностей разрыва сплошности материала.
3. Результаты численного исследования нагружения ударной волной и компактным ударником преград с инородными включениями.
4. Результаты численного исследования процесса ударного взаимодействия компактных и удлиненных ударников со слоисто-скрепленными преградами.
5. Результаты численного исследования ударноволнового нагружения функционально-градиентных преград.

Апробация работы: Материалы диссертационной работы докладывались и

обсуждались на следующих конференциях: VII Всероссийская научно-техническая конференция «Механика летательных аппаратов и современные материалы» (Томск, 1999); I, II, IV Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2000, 2001, 2004); Международная конференция «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике, образовании» ВИТ2001 (Алма-Ата, 2001), ВИТ2003 (Усть-Каменогорск, 2003) и ВИТ 2006 (Павлодар, 2006); Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2002, 2004, 2005); IX Всероссийская научно-техническая конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, 2003); IV Школа-семинар «Физика взрыва и применение взрыва в физическом эксперименте» (Новосибирск, 2003); Научная конференция Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения» (Саров, 2003); Зимняя школа РФЯЦ-ВНИИТФ «Физика экстремальных состояний и процессов» (Снежинск, 2004); Научная сессия молодых ученых научно-образовательного центра «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, 2004); Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (Томск, 2005, 2006); Всероссийская научно-практическая конференция молодежи «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск, 2005); I Всероссийская конференция молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем» (Томск, 2005); V Всероссийская школа-семинар с международным участием «Новые материалы. Создание, структура, свойства» (Томск, 2005); V Международная конференция по внутрекамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольных системах ИСОС'2005 (Москва, 2005); VIII Международная конференция «Забахинские научные чтения» (Снежинск, 2005); Научная сессия МИФИ2004 и МИФИ2005 (Москва, 2004, 2005), III Международная конференция «Перспективы развития фундамен-

тальных наук» (Томск, 2006), Международная школа-семинар «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем» (Санкт-Петербург, 2006), IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 28 печатных работах [1-28].

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы; содержит 110 рисунков, 12 таблиц, библиографический список из 110 наименований – всего 145 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований; сформулирована цель работы; раскрыты ее научная новизна и практическая значимость; приведены сведения о достоверности результатов работы, ее апробации; изложены положения, выносимые на защиту, дано краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена описанию расчетно-математической модели.

В настоящей работе следуя общему и наиболее оправданному подходу к математическому моделированию процессов ударноволнового нагружения твердых тел, считается, что рассматриваемая среда сжимаема, изотропна, отсутствуют массовые силы, внутренние источники тепла и теплопроводность. В этом случае система уравнений для описания деформаций такой среды включает уравнения неразрывности, движения и энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_i (\rho v_i) &= 0, \\ \rho \dot{v}_i - \nabla_j \sigma_{ij} &= 0, \\ \rho \dot{\varepsilon} - \sigma_j \varepsilon_j &= 0, \\ \sigma_{ij} &= \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij}, \varepsilon, t), \quad \nabla_i = \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad i, j = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где ρ_0 – плотность вещества; v_i – компоненты вектора скорости; σ_{ij} , ε_{ij} , ε_j – компоненты тензоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций; ε – удельная внутренняя энергия.

Записанная система уравнений (1.1) выполняется для всех адиабатных процессов, однако она не содержит никаких предположений о частных свойствах вещества. Для ее замыкания необходимо задать дополнительные соотношения между параметрами, учитывающими конкретные физические свойства исследуемой среды. Такими соотношениями являются определяющие уравнения.

В общем случае при ударноволновом нагружении твердого тела происходит как изменение объема (плотности), так и изменение формы, причем по

разным зависимостям. Поэтому при рассмотрении деформации элемента среды целесообразно выделить компоненты напряжений, вызванные изменением его объема и формы. В связи с этим тензор напряжений разбивается на девиаторную и шаровую составляющие:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - P\delta_{ij},$$

где δ_{ij} - символ Кронекера, P - давление.

Определяющие соотношения задавались в форме Прандтля - Рейса при условии текучести Мизеса:

$$\begin{aligned} 2G\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}\right) &= \frac{DS_{ij}}{Dt} + \lambda S_{ij}, \\ \frac{DS_{ij}}{Dt} &= \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik}w_{jk} - S_{jk}w_{ik}, \\ 2e_{ij} &= \nabla_j v_i + \nabla_i v_j; \quad 2w_{ij} = \nabla_j v_i - \nabla_i v_j; \\ 3S_{ij}S_{ij} &= 2\sigma_T. \end{aligned} \quad (1.2)$$

где G - модуль сдвига; σ_T - предел текучести материала; D/Dt - производная Яумана. Производная Яумана учитывает поворот элемента среды во время его перемещения. В упругой области множитель $\lambda = 0$.

Уравнения (1.2) дополняются уравнениями, характеризующими усредненное поведение микроповреждений в виде микропор сферической формы, способных при определенных условиях развиваться в микротрещины. Неоднородную пористую среду будем рассматривать как двухкомпонентный пористый материал, состоящий из твердой фазы - матрицы, и включений - пор. При этом поры в материале матрицы распределены равномерно по всем направлениям. Параметр α и ξ связаны следующими соотношениями:

$$V = V_p + V_s; \quad \alpha = \frac{V}{V_s} = \frac{V_p + V_s}{V_s}; \quad \xi = \frac{V_p}{V}; \quad \alpha = \frac{1}{1-\xi}; \quad \xi = 1 - \frac{1}{\alpha};$$

где V, V_p, V_s - удельный объем пористой среды, пор и матрицы.

Кинетическое уравнение при ($\Delta P > 0$), полученное из приближенного решения задачи о деформации сферической полости под действием приложенного давления, выбрано в виде:

$$\dot{\alpha} = -\frac{(\alpha_0 - 1)^{\frac{2}{3}}}{\eta} \alpha (\alpha - 1)^{\frac{1}{3}} \Delta P \text{sign}(P), \quad (1.3)$$

$$\Delta P = |P| - \frac{a_s}{\alpha} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}.$$

где α_0, a_s, η - константы материала.

Прочностные характеристики материала через пористость ξ определяются следующим образом:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{r_0}}{\alpha}; \quad G = G_0(1-\xi) \left(1 - \frac{6K_2 + 12G_2}{9K_2 + 8G_2} \xi \right), \quad (1.4)$$

где K_2 – объемный модуль сжатия матрицы, G_2 – модуль сдвига матрицы.

Давление в пористой среде вычисляется по уравнению состояния для матрицы:

$$P = P_0(\alpha\rho, \varepsilon); \quad P_r = P_r(\rho_r, \varepsilon)$$

При решении задач удара используются различные уравнения состояния. Следует отметить, что их вид в существенной степени определяется характером межатомного взаимодействия. В общем случае он ничем не ограничен, поэтому целесообразно выбрать его наиболее простым, позволяющим экономить машинное время при решении задач механики деформируемого твердого тела. В работе использовалось уравнение состояния в форме Уолпа. Помимо вышперечисленных качеств данное уравнение удобно тем, что оно содержит небольшое число констант, а в случае отсутствия они определяются по ударной адиабате:

$$P_r = P_A \left(1 - \frac{\gamma}{2} x \right) + \gamma \rho_{0r} \varepsilon; \quad (1.5)$$

$$P_A = \sum_{i=1}^3 k_i (x-1)^i, \quad x = \frac{\rho_r}{\rho_{0r}}, \quad \gamma = \gamma_0(1-x),$$

где k_i – константы уравнения, γ – коэффициент Грюнайзена.

Известно, что разрушение хрупких и пластичных материалов при действии ударноволнового нагружения может происходить по отрывному или сдвиговому механизму. Хотя в частном случае может доминировать один тип разрушения в целом, при решении прикладных задач необходимо учитывать оба типа разрушений.

Будем считать, что отрывные разрушения происходят при достижении главным растягивающим напряжением значения откольной прочности:

$$\sigma_1 \geq \sigma_k \quad (1.6a)$$

либо при достижении пористостью предельного значения:

$$\xi \geq \xi^* \quad (1.6b)$$

Для прогнозирования сдвиговых разрушений используется критерий, где мерой повреждения материала является удельная работа сдвиговых пластических деформаций A_p .

При выполнении условия:

$$A_p \geq A_p^*; A_p = \int_0^* dA_p = \int_0^* \frac{\sigma_y d\varepsilon_y^p}{\rho} \quad (1.6в)$$

материал считается разрушенным по типу сдвига (A_p^* - критическое значение удельной работы сдвиговых пластических деформаций).

Для большинства рассматриваемых в работе материалов:

$$\sigma_K = (0,02 \div 5,0) \text{ ГПа}, \xi^* = (0,30 \div 0,33), A_p^* = (25 \div 200) \text{ кДж / кг}$$

Будем считать, что при выполнении одного из выше перечисленных условий в какой-либо точке среды в ее ближайшей окрестности образуется проходящая через данную точку контактная поверхность, которая в процессе деформирования может стать свободной поверхностью. Таким образом, при моделировании допускается появление новых свободных поверхностей, в том числе разделяющих рассматриваемое тело на отдельные фрагменты. Для отрывного разрушения ориентация трещин определяется согласно гипотезе о перпендикулярности ее плоскости максимальному главному растягивающему напряжению. Для сдвигового разрушения ориентация трещины определяется плоскостью действия максимальных касательных напряжений.

Замкнутая система уравнений, описывающая нестационарное движение сжимаемой упругопластической, пористой среды для задач удара в нетривиальных случаях аналитического решения не имеет. В диссертационной работе для ее решения предложен подход, базирующийся на лагранжевом методе Джонсона. Для более правильного и детального описания процессов пробития и проникания в методе численного решения должна быть заложена возможность выделения поверхностей разрыва сплошности материала. Существующие в настоящее время способы выделения таких поверхностей предполагают введение заранее линии сдвоенных узлов, либо используют локальную перестройку сетки, либо алгоритм расщепления узлов с автоматической перестройкой свободной поверхности. Данные способы мало пригодны для моделирования разрушения современных ударников и преград при наличии разноплотных материалов и появлении ветвящихся разрывов.

В настоящей работе предложен и апробирован следующий подход. В каждом расчетном элементе вычисляются главные растягивающие напряжения. При выполнении условия разрушения (1.6а) и (1.6б) вычисляется главная площадка, которая переносится параллельно из центра рассматриваемой ячейки в ближайший к ней узел. Затем данный узел расщепляется в направлении плоскости этой площадки. Если вычисленная площадка не совпадает со сторонами ассоциированных элементов, то направление расщепления выбирается по сторонам соединяющим ближайшие к площадке узлы сетки. При выполнении критерия разрушения (1.6в), рассматриваемый узел расщепляется по прямой, лежащей в плоскости действия максимальных касательных напряжений.

Такой подход не предполагает расщепление узла заведомо, следовательно, хранить какую-либо дополнительную информацию, как при введении линии сдвоенных узлов, нет необходимости. Также в этом подходе образование новой свободной поверхности не сопровождается "перетеканием" вещества из одной ячейки в другую как при локальной перестройке расчетной сетки, поэтому и параметры, и уравнение состояния содержимого ячейки не изменяются на протяжении всего процесса. Кроме того, при этом не требуется для случая различных материалов в ассоциированных с узлами ячеек проводить усреднение критерия разрушения, приводящее к снижению точности расчетов, как это происходит при расщеплении узлов с автоматической перестройкой свободной поверхности.

Схема расщепления расчетного узла, основанная на критерии главного растягивающего напряжения, изображена на рис. 1. В результате расщепления появляются новые узлы, координаты и скорости которых прежние, а масса и другие параметры, вычисляемые через элементы, перевычисляются.

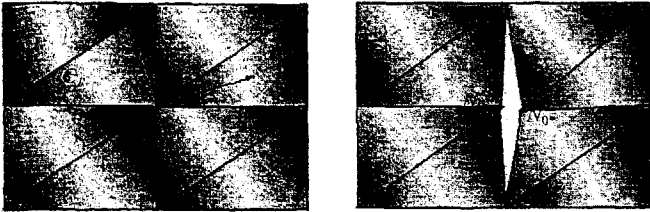


Рис. 1. Схема расщепления расчетных узлов

Механизм разрушения расчетных элементов вводится на свободных и контактных поверхностях подобно эрозионному процессу. Критерием эрозии выбрана эквивалентная пластическая деформация ϵ^p . Если в одном из элементов выполняется критерий, то он удаляется из счета, а свободная и контактная поверхность автоматически перестраиваются. При этом масса удаленного элемента сохраняется в ассоциированных с ним узлах, импульс которых консервативен. Свободные узлы, т.е. узлы, не имеющие ассоциированных элементов, также консервативны по массе и импульсу и подобно другим граничным узлам участвуют в вычислениях.

В отличие от большинства существующих подходов к описанию разрушения, предложенный подход, позволяет решать многоконтактные задачи удара с учетом фрагментации.

Во второй главе проведено тестирование разработанной методики численного моделирования на качественное и количественное соответствие параметрам моделируемого процесса, а также бесспорным физическим соотношениям.

Достоверность результатов численного моделирования устанавливалась решением ряда тестовых задач: о расчете амплитуд и скоростей ударных волн, о соударении двух одинаковых цилиндров, об ударе цилиндра по жесткой стенке, о пробитии стальным шариком однородных и двухслойных преград и о глубоком внедрении ударников с оживальной головной частью в полубесконечные преграды.

Вначале рассчитанные при помощи разработанной методики численного моделирования значения амплитуд и скоростей плоских ударных волн сравнивались с аналитическим решением Ренкина — Гюгоно. Были рассмотрены материалы с начальными плотностями от $1,75 \text{ г/см}^3$ до 17 г/см^3 . Во всех случаях расхождение не превышало 0,2%.

Полная симметрия процесса как относительно контактной поверхности, так и относительно оси взаимодействующих тел была продемонстрирована при расчете задачи о соударении двух одинаковых цилиндров. Анализируя аналитические и расчетные значения в задаче распада разрыва можно утверждать о соответствии созданной методики положенным в ее основу соотношениям и законам.

Кроме проверки численной модели на соответствие теоретическим данным, основанным на общефизических соображениях, было проведено сравнение численных расчетов с экспериментальными данными сотрудников НИИ ГИМ при ТГУ В.И. Афанасьева, В.М. Захарова, Ю.Н. Орлова, В.П. Глазырина, Ю.Ф. Христенко.

С этой целью решены задачи об ударе стального цилиндра размерами $l_0 = 46,94 \text{ мм}$ и $d_0 = 7,62 \text{ мм}$ по жесткой стенке, о сквозном пробитии стальным шариком $d_0 = 12,7 \text{ мм}$ однородных и двухслойных преград, и о глубоком внедрении сердечников пуль 6,1В32 (Россия) и 6,1Smk (Германия) в полубесконечные алюминиевые преграды.

Расхождения между укорочением (отношение конечной длины к начальной l_e/l_0) зафиксированные в расчете и эксперименте при решении задачи об ударе цилиндра по жесткой стенке не превышали 2%. Начальная скорость варьировалась от 161 м/с до 367 м/с.

Моделирование процесса пробития однородных и двухслойных преград из стеклотекстолита и алюминия осуществлялось для диапазона начальных скоростей удара от 373 м/с до 932 м/с. Сравнивались запреградные скорости центра масс ударников зафиксированные в расчете V_p и эксперименте V_e . Во всех случаях расхождения не превысило 4,5%.

Результаты расчетов внедрения ударников с оживальной головной частью в преграды для диапазона от 336 м/с до 1031 м/с показали, что расхождения между расчетной глубиной проникания L_p и зафиксированной в эксперименте не превышают 5%.

Кроме этого проверка численного решения осуществлялась путем контроля за сохранением системой энергии. В процессе счета, отслеживалась величина дисбаланса энергии, показывающая отклонение от закона сохранения энергии.

В третьей главе рассмотрено влияние неоднородностей в пластине на процесс ее разрушения. В качестве объекта исследования выбраны однородные и неоднородные пластины бесконечной длины из стали и алюминиевого сплава толщиной 10 мм и длиной 40 мм. Прямоугольные в сечении включения размерами (1,7×2,0) мм как бы армируют часть преграды в шахматном порядке от тыльной стороны ее поверхности вглубь в четыре ряда



Рис. 2. Исходная конфигурация преграды

(рис. 2).

Поведение стальной неоднородной пластины с включениями из парафина, алюминиевого сплава, меди, упрочненного медного сплава, ВНЖ, а также стального сплава с увеличенным на 40% значением предела текучести σ_T и откольной прочности σ_K моделировалось при помощи разработанной методики численного моделирования для двумерного плоского случая.

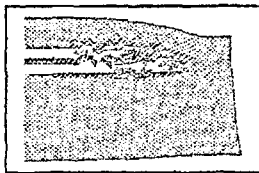


Рис. 3. Однородная стальная преграда в $t = 12$ мкс и профиль скорости тыльной поверхности

появляются на 4-ой мкс. Далее они растут, и к 12-ой мкс картина разрушения полностью формируется в виде образования

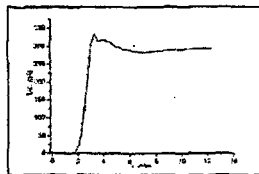
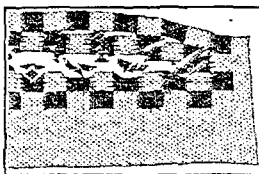


Рис. 4. Образец с алюминиевыми включениями

350 м/с до 311 м/с. В дальнейшем на графике наблюдается еще одно возрастание скорости с 4-й по 5-ю мкс, при этом движение при $t = 12$ мкс происходит со скоростью равной 261,5 м/с.

Нагружение однородного стального образца осуществлялось плоской ударной волной с начальной амплитудой 175 м/с. Было установлено, что первые очаги разрушения вследствие действия растягивающих напряжений появляются на 4-ой мкс. Далее они растут, и к 12-ой мкс картина разрушения полностью формируется в виде образования откольной тарелочки (рис. 3).

Из рассчитанного профиля скорости тыльной поверхности видно, что амплитуда ударной волны при ее выходе на тыльную поверхность была уже понижена действием догоняющей волны разгрузки с

В варианте расчета стальной пластины с алюминиевыми включениями наблюдалось разрушение материала матрицы и включений (рис. 4). При сравнении формы волновых профилей для вариантов с однородной пластиной и пластины с алюминиевыми включениями было установлено, что в последнем случае наблюдается довольно «затянутое» торможение поверхности.

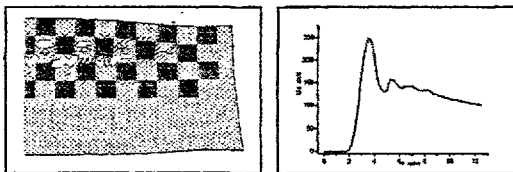


Рис. 5. Образец с ВНК включениями

Развитие разрушений в образце с ВНК включениями проходило с меньшей интенсивностью, чем во всех предыдущих вариантах. Слабые, едва заметные очаги разрушения появлялись в материале матрицы. Материал включений, как показано на рис. 5 сплошности не нарушил. На профиле скорости тыльной поверхности наблюдается падение скорости с 248 м/с до 129,2 м/с, что является наибольшей величиной из всех рассмотренных вариантов. Результаты расчетов остальных вариантов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Вид и степень разрушения неоднородных стальных образцов

Материал включений	$\rho_{OM} \div \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} \div \sigma_{KB}$	Вид разрушений
1.1. Сталь	$\rho_{OM} = \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	Откол
1.2. Парафин	$\rho_{OM} > \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	Раз-я в м-це и вкл-ях
1.3. Алюминиевый сплав	$\rho_{OM} > \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	Разрушения, откол
1.4. Медь	$\rho_{OM} < \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	Раз-я средней степени
1.5. Медный сплав	$\rho_{OM} < \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	Откол
1.6. ВНК	$\rho_{OM} < \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	Слабые раз-я м-цы
1.7. Сталь ($\sigma_t \times 40\%$)	$\rho_{OM} = \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	Откол
1.8. Сталь ($\sigma_T \times 40\%$)	$\rho_{OM} = \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} < \sigma_{KB}$	Средняя степень раз-я

Примечание. Индексы «м» и «в» относятся к материалу матрицы и включений соответственно.

Таким образом, картины разрушения рассмотренных пластин могут существенно изменяться в зависимости от вида включений. Путем подбора их материалов можно управлять процессами разрушения в целом, увеличивая их объем в материале матрицы и уменьшая в материале включений, либо наоборот.

Изучение поведения неоднородной алюминиевой пластины в условиях нагружения плоским ударным импульсом продиктовано широким использованием алюминия в качестве конструкционного материала. Для выявления влияния наличия неоднородностей в алюминиевой пластине на процесс ее разрушения, была проведена серия вычислительных экспериментов, где в качестве включений использовались следующие материалы и сплавы: парафин, бериллий, сталь, медь, медный сплав, вольфрамовый сплав ВГЖ, алюминиевые сплавы с увеличенным на 40% значением σ_k и увеличенным на 40% значением σ_T .

Нагружение неоднородных пластин из алюминиевого сплава осуществлялось ударной волной с начальной амплитудой 125 м/с, поэтому во всех вариантах зарождение первых очагов разрушения происходило несколько раньше, чем в случае неоднородных стальных пластин. В случае однородного алюминиевого образца приповерхностный слой в откольной тарелочке, имел наименьший объем разрушений из всех вариантов. В связи с этим на профиле скорости тыльной поверхности наблюдалось большое количество колебаний за фронтом волны. В образце со стальными включениями зафиксированы разрушения матрицы. Обильные разрушения отмечены в пластине с парафиновыми включениями, а незначительные — в пластине с ВГЖ включениями. Полученные, при детальном анализе вид и степень разрушения для девяти вариантов расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Вид и степень разрушения неоднородных алюминиевых образцов

Материал включений	$\rho_{OM} + \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} + \sigma_{KB}$	Вид разрушений
2.1. Ал. Сплав	$\rho_{OM} = \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	Откол
2.2. Парафин	$\rho_{OM} > \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	Разрушения во вкл-ях
2.3. Бериллий	$\rho_{OM} > \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	Средняя степень раз-я
2.4. Сталь	$\rho_{OM} < \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} < \sigma_{KB}$	Разрушения матрицы
2.5. Медь	$\rho_{OM} < \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} < \sigma_{KB}$	Средняя степень раз-я
2.6. Медный сплав	$\rho_{OM} < \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	Средняя степень раз-я
2.7. ВГЖ	$\rho_{OM} < \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} < \sigma_{KB}$	Слабые раз-я матрицы
2.8. Ал. Спл ($\sigma_k \times 40\%$)	$\rho_{OM} = \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} < \sigma_{KB}$	Слабые раз-я матрицы
2.9. Ал. Спл ($\sigma_T \times 40\%$)	$\rho_{OM} = \rho_{OV}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	Слабые раз-я матрицы

На основе проведенной серии вычислительных экспериментов по нагружению плоской ударной волной неоднородной алюминиевой пластины установлено следующее. Наличие инородных включений в матрице алюминиевой пластины приводит к существенному изменению вида и степени разрушения. Путем подбора материала включений можно управлять процессами разрушениями всего образца.

Далее численно моделировался процесс взаимодействия стального ударника размерами (5×5) мм с неоднородной стальной пластиной при $V_0 = 500$ м/с. Расположение и размеры инородных включений такие же, как на рис. 2. В процессе счета фиксировалась скорость центра масс ударника V_c и глубина его внедрения L_k . На момент времени 16 мкс счет прекращался, т.к. при этом падение скорости ударника было незначительным, а объем и форма областей разрушений практически не менялись.

С целью выявления влияния наличия неоднородностей в стальной пластине на процесс ее разрушения были решены задачи об ударном нагружении стальной преграды с включениями из парафина, алюминия, меди, вольфрамового сплава. Кроме этого в качестве материала включений использовались алюминиевый сплав с увеличенным значением откольной прочности до 2,9 ГПа, а также стальные сплавы с уменьшенными значениями $\sigma_T = 0,28$ ГПа и $\sigma_k = 1,9$ ГПа.

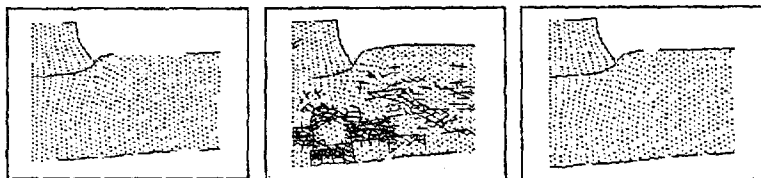


Рис. 6. Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» однородного стального образца, а также пластины с алюминиевыми и ВНЖ включениями в $t = 16$ мкс

На рис. 6 представлены конечные конфигурации «ударник – мишень» полученные расчетным путем для вариантов с однородной пластиной, а также пластин с алюминиевыми и ВНЖ включениями.

Зависимости скорости центра масс ударника от времени показаны на рис. 7. Кривые В, С, D, E, F на нем относятся к однородной стальной пластине, пластине с алюминиевыми включениями, пластине с включениями из алюминиевого сплава с $\sigma_T = 0,28$ ГПа, а также образцам с медными и ВНЖ включениями, соответственно.

При детальном анализе было установлено, что в тех вариантах, в которых проникание ударника сопровождалось разрушением как материала матрицы, так и материала включений на графике зависимости $V_c(t)$ колебания отсутст-

вуют, что обусловлено быстрым затуханием волн, вызванным их многократным отражением от свободных поверхностей, появляющихся в материале пластины в процессе ее деформирования.

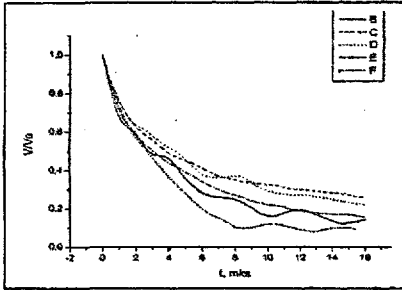


Рис. 7. Зависимость скорости центра масс ударника от времени $V_c(t)$

В таблице 3 приведены рассчитанные значения V_c и L_k . Нетрудно заметить, что в вариантах, где начальная плотность матрицы больше начальной плотности включений $\rho_{OM} > \rho_{OB}$ и $\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$ эти значения — наибольшие. При $\rho_{OM} < \rho_{OB}$ и $\sigma_{KM} < \sigma_{KB}$ они наименьшие.

Расчеты показали, что при действии компактного ударника на процесс разрушения рассмотренных преград значительное влияние оказывала величина кольцевой прочности включений.

Изменение плотности и предела текучести материала включений приводило к некоторому изменению значений глубины L_k и скорости V_c . Установлено, что в вариантах, в которых проникание ударника сопровождалось обильным разрушением материала преграды на графике зависимости $V_c(t)$ колебания отсутствуют. Это обусловлено быстрым затуханием волн, вызванным их многократным отражением от новых свободных поверхностей, появляющихся в материале преграды в процессе ее деформирования. Колебания на этой зависимости имеют место тогда, когда деформация преград проходит без нарушения сплошности, либо со слабыми разрушениями.

Таблица 3 — Рассчитанные значения скорости V_c и глубины L_k

Материал включений	$\rho_{OM} \div \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} \div \sigma_{KB}$	L_k (мм)	V_c (м/с)
1. Сталь	$\rho_{OM} = \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	1,7	72,0
2. Парафин	$\rho_{OM} > \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	3,8	145,2
3. Алюминиевый сплав	$\rho_{OM} > \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	3,2	128,0
4. Ал. Сплав ($\sigma_T = 2,9$ ГПа)	$\rho_{OM} > \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	2,6	118,0
5. Медь	$\rho_{OM} < \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	2,3	80,4
6. ВНЖ	$\rho_{OM} < \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} < \sigma_{KB}$	1,4	40,0
7. Ст. сплав ($\sigma_T = 0,28$ ГПа)	$\rho_{OM} = \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} = \sigma_{KB}$	2,0	80,3

8. Ст. сплав ($\sigma_s = 1,9 \text{ ГПа}$)	$\rho_{OM} = \rho_{OB}$	$\sigma_{KM} > \sigma_{KB}$	1,8	71,1
---	-------------------------	-----------------------------	-----	------

В четвертой главе решена задача об усилении уже имеющейся защиты. Наиболее простым подходом к ее решению считается добавление еще одного слоя. Однако, расположить дополнительный усиливающий слой, в силу различных причин, можно как с внешней стороны защищаемого объекта, так и с внутренней. При этом соединить основной слой защиты с дополнительным можно несколькими способами, в зависимости от условий эксплуатации конструкции. В связи с этим рассмотрены шесть различных вариантов компоновки стальных преград.

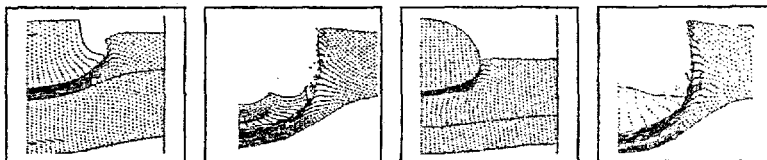
1. Первый тип преград – это однородная преграда толщиной h . Далее обозначение (h) ;
2. Второй тип преграды – это двухслойная преграда, с толщиной верхнего слоя $0,5h$, а нижнего h . Обозначение $(0,5h + h)$. На контактной границе слоев задается условие скольжения. Нижний слой в данном случае будет основным, а верхний – дополнительным;
3. Третий тип преграды, по сути, есть перевернутый второй. На контактной границе также задано условие скольжения. Суммарная толщина преграды равна $h + 0,5h$. Обозначение $(h + 0,5h)$;
4. Четвертый тип по структуре отличается от второго тем, что на контактной границе задается тонкий скрепляющий слой с прочностными характеристиками вдвое меньшими, чем в материале прилегающих слоев. Обозначение $[0,5h + h]$;
5. Пятый тип преграды, по сути, есть перевернутый четвертый. Здесь также имеется тонкий скрепляющий слой. Обозначение $[h + 0,5h]$.
6. Шестой тип преграды – однородная преграда толщиной $1,5h$. Обозначение $(1,5h)$;

Для формализации способов соединения слоев введен коэффициент их скрепления K_c , таким образом, что в случае третьей и четвертой преграды $K_c = 0$, пятой и шестой – $K_c = 0,5$. Если представить однородную преграду, состоящей из двух жестко скрепленных слоев толщиной $0,5h+h$, то в этом случае $K_c = 1$. Рассматривался частный случай однородной преграды при $h = 4$ мм. Очевидно, что максимальной ударной стойкостью будет обладать преграда (6), а минимальной – (4). В настоящей главе целью являлось именно проведение количественной оценки сравнительной стойкости преград. Для этого был введен безразмерный критерий стойкости, показывающий относительное снижение скорости удара на конкретной преграде:

$$R = 1 - \frac{V_i - V_6}{V_4 - V_6}, \quad i = 1, \dots, 6,$$

где V_i — скорость центра масс ударника при действии по i — той преграде в момент времени окончания счета t_k ; V_4, V_6 — то же для преград (4) и (6) соответственно. Очевидно, что для (4) всегда $R = 0$ и для (6) всегда $R = 1$.

Компактные ударники, одинаковые по массе, имели цилиндрическую и сферическую формы. Размеры цилиндра в сечении (5×5) мм, а диаметр сферического — 5,81 мм. Начальная скорость удара варьировалась в диапазоне от 500 м/с до 1500 м/с.

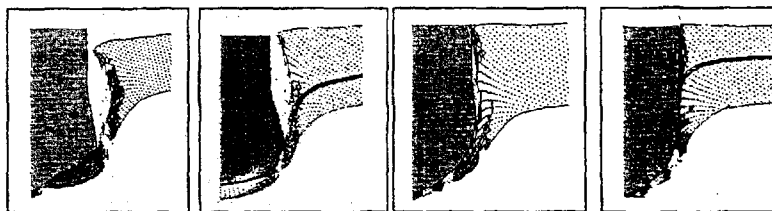


а) (2+4), $V_0 = 800$ м/с б) [2+4], $V_0 = 1500$ м/с в) (4+2), $V_0 = 500$ м/с г) [4+2], $V_0 = 1500$ м/с;
Рис. 8. Конфигурации «ударник — мишень» при $t = 20$ мкс

Анализ напряженно-деформированного состояния материала ударника и преграды показал, что первые очаги разрушения, образованные вследствие действия растягивающих напряжений, появляются в материале преграды вблизи тыльной поверхности на 2-й мкс счета, а уже на 6-й мкс происходят сдвиговые разрушения материала преграды в узкой области по периметру ударника (рис. 8).

Удлиненные ударники были равны по массе и диаметрам. Рассматривались цилиндрические однородные элементы с конической и оживальной головными частями (КГЧ и ОГЧ). Ударник с ОГЧ представлял из себя сердечник пули 6.1Smk (Германия). Длина 16 мм, диаметр 6,1 мм, масса 2,55 г. Длина ударника с КГЧ составляла 13,1 мм, угол при вершине конуса — прямой.

Из анализа деформационных картин разрушения преград, полученных при действии ударника с КГЧ было установлено, что в течение всего процесса цилиндрическая поверхность ударника не взаимодействовала с материалом преграды. Пробитие происходило по сдвиговому механизму, путем срезания «пробки» (рис. 9а-б). При внедрении ударника с ОГЧ материал преграды уплотнялся вокруг оживала по всей длине, причем преграды как бы прокатывались под его действием (рис. 9в-г). Во всех случаях материал ударника не разрушился.



а) (4), $t = 40$ мкс б) [4+2], $t = 42$ мкс в) (6), $t = 40$ мкс г) [2+4], $t = 42$ мкс
Рис. 9. Рассчитанные конфигурации «ударник – мишень» для КГЧ и ОГЧ

На полученной зависимости $V_c(t)$ можно выделить участки быстрого и медленного снижения скорости ударника. С увеличением начальной скорости ударника наблюдается уменьшение продолжительности участка быстрого снижения скорости ударника.

В таблице 4 представлены рассчитанные значения критерия стойкости R для 48 вариантов расчетов. Запись $C(500-35)$ означает, что имеется ввиду цилиндрический ударник с начальной скоростью 500 м/с и 33 м/с его скорость в случае преграды (4). Запись $S(500-35)$ имеет аналогичный смысл для сферического ударника.

Таблица 4 – Рассчитанные значения критерия R

Преграда	(4)	(2+4)	(4+2)	[2+4]	[4+2]	(6)
Коэф-нт скрепления	$K_c = 1$	$K_c = 0$		$K_c = 0,5$		$K_c = 1$
1. $C(500-33)$	0	0,37	0,31	0,93	0,91	1
2. $S(500-35)$	0	0,32	0,29	1,0	0,96	1
3. $C(800-65,5)$	0	0,44	0,38	0,95	0,93	1
4. $S(800-91,1)$	0	0,54	0,49	0,98	0,97	1
5. $C(1500-565)$	0	0,98	0,93	0,99	0,97	1
6. $S(1500-590)$	0	0,95	0,87	0,98	0,96	1
7. КГЧ (700-366)	0	0,74	0,72	0,86	0,74	1
8. ОГЧ (700-419)	0	1,18	0,51	0,66	0,57	1

Из таблицы видно, что при $V_0 = 500$ м/с стойкость преград с $K_c = 0$ при действии компактных ударников практически в три раза меньше, чем стойкость преград с $K_c = 0,5$. С ростом начальной скорости удара значение критерия стойкости преград с $K_c = 0$ заметно растет, при этом остается меньше, чем для преград с $K_c = 0,5$. С ростом скорости удара влияние способа скрепления

слоев заметно ослабевает, и стойкость двухслойных преград приближается к стойкости однородной преграды.

При действии ударника с КГЧ, вычисленные значения критерия R больше, чем при действии ударника с ОГЧ. Исключение составляет вариант (2+4) для ударника с ОГЧ, в котором рассчитанное значение R было на 18% больше, чем в варианте (6). Детальный анализ динамики процесса пробития показал, что повышенная стойкость в этом случае объясняется более сильным, чем в других вариантах заземляющим действием верхнего слоя преграды. Разгрузка материала данного слоя вызывает его движение навстречу ударнику, тем самым оказывая дополнительное действие, снижающее скорость ударника.

Установлено, что все значения критерия стойкости R , соответствующие вариантам, в которых дополнительный слой использовался в качестве лицевого, больше, чем его значения относящиеся к вариантам, где дополнительный слой был тыльным, независимо от способа скрепления с основным и начальной скорости удара.

В пятой главе проведено исследование ударноволнового нагружения преград с градиентом прочностных свойств. А именно, исследовано влияние линейного изменения характеристик, отвечающих за образование отрывных и сдвиговых разрушений по всей толщине преграды от поверхности нагружения до тыльной на процесс ее деформации и разрушения.

Выбранные интервалы изменения прочностных характеристик соответствуют реальным стальным сплавам. Откольная прочность σ_k в расчетах варьировалась от 2,1 ГПа до 3,5 ГПа, а значение A_p^* - от 35 кДж/кг до 55 кДж/кг. Изменение данных характеристик по толщине преграды задавалось возрастающей или убывающей линейной функцией. Для однородной преграды $\sigma_k = 2,8$ ГПа, $A_p^* = 45$ кДж/кг.

Всего рассмотрено девять вариантов сочетаний изменения значений σ_k и A_p^* по толщине преграды. Для удобства введены следующие индексы '—', '↑', '↓', которые означают соответственно, постоянство, возрастание и убывание указанной характеристики по толщине преграды. Например, если преграда обозначена как $[\sigma_k^-, A_p^-]$, то по всей толщине преграды σ_k и A_p^* не меняются.

Если преграда обозначена как $[\sigma_k^+, A_p^+]$, то σ_k - возрастает, а A_p^* - убывает от поверхности нагружения до тыльной поверхности. Аналогичным образом обозначены остальные семь преград.

Воздействие на преграды задавалось в виде нагружения плоской ударной волной и в виде удара по нормали компактным и удлиненным стальными элементами. Размеры преград следующие: диаметр 4 см, толщина 1,2 см.

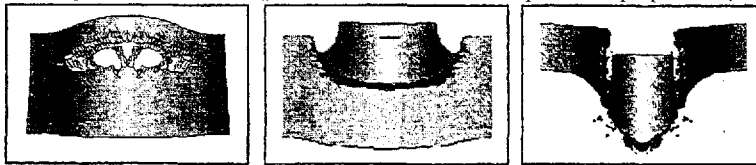
Вначале проведена серия вычислительных экспериментов по нагружению преград плоским ударным импульсом длительностью 1,2 мкс и амплитудой 175 м/с. В ходе расчетов в каждый момент времени определялись напряжен-

но-деформированное состояние, объем и форма разрушений, а также скорость тыльной поверхности на оси симметрии.

Результаты расчетов однородной преграды $[\sigma_k^-, A_k^-]$ показали, что отделение откольной тарелочки сопровождалось разрушениями средней степени интенсивности, имеющими в основном отрывной характер (рис. 10а). На волновом профиле амплитуда ударной волны была понижена действием догоняющей волны разгрузки по сравнению с начальной на 18,6%. Визуально, результаты расчетов для вариантов $[\sigma_k^-, A_k^+]$ и $[\sigma_k^-, A_k^-]$ практически совпали. Цифровые значения по напряженно-деформированному состоянию и скорости тыльной поверхности для вариантов $[\sigma_k^+, A_k^-]$, $[\sigma_k^+, A_k^+]$ и $[\sigma_k^+, A_k^+]$, согласно расчетным данным, отличались друг от друга не более, чем на 0,5%. Отмечено, что объем разрушений приповерхностного слоя откольной тарелки был наименьший. Наибольший объем разрушений зафиксирован в вариантах $[\sigma_k^+, A_k^-]$, $[\sigma_k^+, A_k^+]$ и $[\sigma_k^+, A_k^+]$. При возрастании величины σ_k по толщине преграды образование откольной тарелки сопровождается меньшими разрушениями приповерхностного слоя по сравнению со случаем однородной преграды.

Далее проведено моделирование ударного взаимодействия компактного цилиндрического стального ударника по нормали с выше рассмотренными преградами с начальной скоростью 800 м/с. Размер ударника в осевом сечении составляет (5 × 5) мм.

В процессе счета фиксировались: скорость центра масс ударника V_c , глубина внедрения ударника L_k , деформационная картина и области разрушения. В момент времени 20 мкс в рассматриваемом сечении взаимодействующих тел вычисляли площадь разрушенного материала преграды в области контакта «ударник — мишень» - S_k и в области тыльной поверхности преграды - S_b .



а) $[\sigma_k^-, A_k^-]$, $t = 20$ мкс б) $[\sigma_k^+, A_k^-]$, $t = 20$ мкс в) $[\sigma_k^+, A_k^-]$, $t = 44$ мкс

Рис. 10. Рассчитанные конфигурации преград из однонаправленного ФГМ

Расчетами выявлено, что уже на 2-й мкс счета происходит расщепление расчетных узлов и разрушение расчетных элементов, что в рамках используемой модели соответствует зарождению сдвиговых очагов разрушений в области контакта «ударник — мишень». Во всех вариантах материал ударника растекался в радиальном направлении, образуя в преградах вмятину, но так и не пробивая их (рис. 10б).

Результаты расчетов для девяти вариантов приведены в таблице 5. В последнем столбце представлен суммарный объем $S_{\Sigma} = S_k + S_b$.

Таблица 5 – Результаты расчетов функционально-градиентных преград

Тип преграды	V_c ($t = 20$ мкс)	L_k [мм]	S_k [мм ²]	S_b [мм ²]	S_{Σ} [мм ²]
1. $[\sigma_k^-, A_k^-]$	25,95	2,79	1,9	0,45	2,35
2. $[\sigma_k^+, A_k^-]$	23,23	3,00	2,64	0	2,64
3. $[\sigma_k^+, A_k^+]$	19,74	2,79	2,11	3,16	5,27
4. $[\sigma_k^-, A_k^+]$	23,39	2,95	2,84	0,43	3,27
5. $[\sigma_k^-, A_k^+]$	9,55	2,71	0,64	0,48	1,12
6. $[\sigma_k^+, A_k^+]$	23,56	2,75	2,6	0	2,6
7. $[\sigma_k^+, A_k^+]$	9,77	2,77	1,08	3,6	4,69
8. $[\sigma_k^+, A_k^+]$	14,71	2,91	0,3	0	0,3
9. $[\sigma_k^+, A_k^+]$	23,75	2,74	2,84	2,60	5,44

Из таблицы видно, что снижение сдвиговой прочности по толщине преграды приводит к более быстрому снижению скорости ударника по мере его внедрения. Наименьшие разрушения получены при росте отрывной и снижении сдвиговой прочности материала преграды.

Для выявления влияния формы ударника на процесс пробития градиентных преград проведена серия вычислительных экспериментов по взаимодействию сердечника пули 6,1Smk с вышерассмотренными образцами (рис. 10в). Начальная скорость также была равной 800 м/с.

Для количественного описания ударной стойкости преград в рассмотрение был введен безразмерный критерий, выраженный через значение начальной скорости центра масс ударника V_c и его скорости в момент времени $t_k = 42$ мкс.

$$R_1 = \frac{(V_0 - V_c^*)}{V_0};$$

где V_0 – начальная скорость ударника, V_c^* – скорость центра масс ударника в момент времени $t_k = 42$ мкс.

Установлено, что все вычисленные значения критерия стойкости R_1 расположены на интервале действительных чисел от 0,49 до 0,67. В базовом варианте при скорости $V_c(t_k) = 286,3$ м/с рассчитанное значение R_1 составило 0,64. Значения критерия стойкости равные 0,49 и 0,50, соответственно были

получены в вариантах $[\sigma_k^-, A_k^\dagger]$ и $[\sigma_k^\dagger, A_k^\dagger]$. В остальных случаях они были выше, а в вариантах $[\sigma_k^-, A_k^\dagger]$ и $[\sigma_k^\dagger, A_k^\dagger]$ получились равными 0,67.

Таким образом, в случае удлиненного ударника в процессе разрушения преобладал сдвиговой механизм, а увеличение сдвиговой прочности по толщине преграды приводило к более быстрому снижению его скорости.

Основные выводы и результаты

1. На основе предложенного подхода для математического моделирования высокоскоростного деформирования сжимаемого, пористого, упругопластического материала, учитывающего в явном виде образование отрывных и сдвиговых разрушений разработана новая модификация метода численного моделирования применительно к решению многоконтактных задач удара, в том числе глубокого внедрения ударников и сквозного пробития преград. Представляется возможным иметь полную информацию о напряженно-деформированном и термодинамическом состоянии элементов конструкции в любой момент времени, а также получить по времени всю картину внедрения, пробития и образования осколков с учетом ударноволнового характера деформирования и разрушения, как материала ударника, так и преграды.

2. Для случая плоской и осевой симметрии в двумерной постановке создан программный комплекс, позволяющий в интерактивном режиме подготавливать начальные данные, включая автоматическое разбиение расчетной области, осуществлять расчет в консольном режиме, а также проводить графическую и табличную обработку полученных результатов. В процессе счета можно отслеживать расчетные параметры среды (скорость, давление, напряжение и т.д.) как в целом по конфигурации, так и в отдельно интересующие оператор моменты времени и местах. В любой выбранный момент времени можно вывести на экран монитора рассчитанные конфигурации, поля скоростей, изолинии параметров и их карт в заданных оператором цветах, а также площадки к главным напряжениям.

3. Путем решения ряда тестовых задач: о расчете амплитуд и скоростей ударных волн, о соударении двух одинаковых цилиндров, об ударе цилиндра по жесткой стенке, о пробитии сферическим ударником однородных и двухслойных преград и о глубоком внедрении ударников с оживальной головной частью в полубесконечные преграды проведена проверка достоверности результатов численного моделирования. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о перспективности разработанной методики для решения задач удара, связанных с процессами пробития и проникания.

4. Численным моделированием установлено, что при наличии в однородной пластине включений, путем подбора их материалов можно управлять процессами ее разрушения при различных начальных условиях нагружения с

целью прогноза их стойкости. Получено, что при ударноволновом нагружении структурно-неоднородных преград в процессе их разрушения определяющую роль играет характеристика, отвечающая за образование отрывных разрушений и поэтому изменение других прочностных характеристик, на процесс разрушения влияло слабо. При действии компактного ударника основное влияние оказывала также величина откопной прочности включений. Изменение плотности и предела текучести материала включений в этом случае приводило к некоторому изменению значений глубины внедрения и скорости ударника.

5. Численно установлено, что расположение дополнительного слоя на лицевой поверхности преграды при действии как компактных, так и удлиненных ударников придавало защитной конструкции большую стойкость, чем расположение его на тыльной поверхности независимо от способа скрепления. С увеличением начальной скорости удара влияние скрепления слоев ослабевает, и стойкость преград без скрепления приближается к стойкости однородной преграды такой же толщины. При действии ударника с КГЧ значения критерия стойкости преграды всегда были больше, чем при действии ударника с ОГЧ, за исключением варианта компоновки преграды, в котором дополнительный слой обладает повышенным защемляющим действием.

6. Получено, что при нагружении плоской ударной волной преград с градиентом прочностных свойств изменение характеристики, отвечающей за образование сдвиговых разрушений, на общую картину разрушения не влияло. В случае нагружения градиентных преград компактным ударником быстрее всего снижение его скорости происходит при уменьшении сдвиговой прочности от лицевой до тыльной поверхности. Изменение сдвиговой и откопной прочности по толщине преграды слабо влияет на глубину внедрения компактного ударника. Наименьший объем разрушения преграды при действии компактного ударника зафиксирован при увеличении отрывной и снижении сдвиговой прочности от лицевой поверхности к тыльной. При нагружении градиентных преград удлиненным ударником, в процессе проникания преобладал сдвиговой механизм разрушения. При этом наибольшее снижение скорости центра масс ударника отмечено при увеличении сдвиговой прочности от лицевой поверхности до тыльной.

7. Разработанные средства математического моделирования и полученные результаты могут быть полезны как для выявления основных закономерностей и механизмов высокоскоростного деформирования и разрушения структурно-неоднородных материалов, так и при выработке практических рекомендаций по поиску оптимальных путей повышения стойкости перспективных противоударных защит.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Орлов М.Ю. Численное моделирование отколов в металлах // Механика летательных аппаратов и современные материалы / Под ред. К.О. Сабденова. – Томск: Изд-во ТГУ, 1999. – С.154-155

2. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование пробития слоистых преград комбинированным ударником // Исследование по баллистике и смежным вопросам механики, Вып.3 / Под ред. И.Б. Богоряда. – Томск: Изд-во ТГУ, 1999. - С. 96-97

3. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование откола в пластинах с неоднородностями // Исследование по баллистике и смежным вопросам механики, Вып.4 / Под ред. И.Б. Богоряда. – Томск: Изд-во ТГУ, 2001. - С. 68-70.

4. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование ударного нагружения неоднородных преград // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Доклады III Всероссийской научно-технической конференции, – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. - С. 148-149.

5. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Анализ импульсного нагружения скрепленных преград // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики. Доклады III Всероссийской научно-технической конференции, – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. - С. 150-151.

6. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Моделирование ударного нагружения неоднородных пластин // Вычислительные технологии. – 2002. - Т.7, - Ч.2, Спец. Выпуск. – С. 154-162.

7. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Поведение неоднородных преград при динамическом нагружении// Исследование по баллистике и смежным вопросам механики, Вып.5 / Под ред. И.Б. Богоряда. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002 - С. 106-108.

8. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Численное моделирование процесса ударного нагружения двухслойных преград // Тезисы докладов IV Школы- семинара «Физика взрыва и применение взрыва в физическом эксперименте». – Новосибирск: Изд-во Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 2003.- С 52-53.

9. Орлов М.Ю. Исследование ударного нагружения неоднородной пластины // Региональная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука, Техника, Инновации»: тезисы докладов в 5-ти частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002, Ч.1, С. 131-132.

10. Глазырин В.П., Иванова Е.М., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н., Платова Т.М. Моделирование пробития скрепленных преград цилиндрическим ударником // Сборник докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск: Изд-во ТГУ, 2002, С. 141-143.

11. Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Моделирование процесса пробития слоистых преград // Вычислительные технологии. 2003. - Т.8, - Ч.4. С. 143-151.

12. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Численный анализ взаимодействия комбинированных ударников с преградами // Вычислительные технологии. 2003. - Т.8, - Ч.4. С. 151-156.

13. Орлов М.Ю. Поведение функционально-градиентных преград в условиях динамического нагружения // Материалы сессии молодых ученых научно-образовательного центра «Физика и химия высокоэнергетических систем». Томск: ИФПМ СО РАН, 2004, С. 181-182.

14. Орлов М.Ю. Анализ взаимодействия компактного ударника с функционально-градиентными преградами // Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Техника. Инновации»: Материалы докладов в 6-ти частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004, Ч.1, С. 121-122.

15. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Анализ взаимодействия компактных ударников со скрепленными преградами // Сборник материалов III научной конференции Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». В 2-х томах.- Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004, Т.2. С.543-548.

16. Орлов М.Ю. Моделирование процесса взаимодействия компактного ударника с градиентными преградами // Научная сессия МИФИ-2005. Сборник научных трудов в 15-ти томах. Т.15. Конференция «Молодежь и наука». Автоматика. Микроэлектроника. Электроника. Прикладная физика. М.: МИФИ, 2005, С. 188-189.

17. Орлов М.Ю., Орлов А.Ю., Глазырин К.В., Глазырин В.П. Анализ процесса пробития многослойной преграды со слоями из функционально-градиентного материала // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005, С. 18-19.

18. Орлов М.Ю. Анализ процесса пробития удлиненным ударником функционально-градиентных преград // Сборник материалов первой Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск: Изд-во ТГУ, 2005, С. 370-372.

19. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Влияние функционально-градиентного слоя на стойкость преграды при действии компактного ударника // Труды XI Международной научно-практической конференции молодых ученых «Современные техника и технологии», В двух томах. Томск: Изд-во ТПУ, 2005, Т.2., С. 115-116.

20. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Некоторые аспекты пробития удлиненным ударником градиентных преград // Материалы докладов

Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы авиации и космонавтики», Красноярск: Изд-во СибГАУ, С. 48-49.

21. Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н., Глазырин К.В. К расчету напряженно-деформированного состояния конструкций из функционально-градиентного материала // Труды V Всероссийской школы-семинара «Новые материалы. Создание. Структура. Свойства», Томск: Изд-во ТПУ, 2005, С. 167-170.

22. Орлов М.Ю., Орлов А.Ю. Расчет ударноволнового нагружения преград с градиентом прочностных свойств // Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Техника. Инновации»: Материалы докладов в 7-ми частях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006, Ч.1, С. 154-156.

23. Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Исследование взаимодействия комбинированных ударников с преградами // Химическая физика и мезоскопия. – 2005. – Т.7, – № 3, С. 251-258.

24. Орлов А.Ю., Орлов М.Ю., Платова Т.М. Поведение градиентных материалов в условиях высокоэнергетического воздействия // Сборник материалов II Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», Томск: Изд-во ТГУ, 2006, С. 255-258.

25. Орлов А.Ю., Орлов М.Ю., Глазырин К.В. К вопросу о влиянии функционально-градиентного слоя на процесс пробития двухслойных преград // «Наука. Промышленность. Оборона»: Труды VII Всероссийской научно-технической конференции. Ежегодное приложение к журналу вестник академии военных наук. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006, С. 336-340.

26. Глазырин К.В., Орлов А.Ю., Орлов М.Ю. Влияние функционально-градиентного слоя на стойкость преграды при действии удлиненного удара // Труды XII Международной научно-практической конференции молодых ученых «Современные техника и технологии», В двух томах. Томск: Изд-во ТПУ, 2006, Т.1., С. 448-451.

27. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Расчет ударноволнового нагружения преград с градиентом прочностных свойств // Сборник материалов V Международной школы-семинара «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем», В двух томах. Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ «Военмех», 2006, Т.2., С.79-80.

28. Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлов Ю.Н. Анализ разрушения функционально-градиентных преград при ударном нагружении // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Т. III. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2006, С. 67-68.

. Тираж 110 экз.
Отпечатано в КЦ «Позитив»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а

