

На правах рукописи



ФОРЕНТАЛЬ Михаил Вольдемарович

**ДИНАМИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ  
ПЛАСТИН ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ  
УДАРНИКАМИ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ**

01.02.06 – динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2010

Работа выполнена на кафедре "Прикладная механика, динамика и прочность машин" ГОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет"

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор  
Сапожников Сергей Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Наймарк Олег Борисович  
  
доктор технических наук,  
профессор  
Залазинский Александр Георгиевич

Ведущая организация: Российский Федеральный Ядерный Центр –  
Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики  
им. акад. Е.И.Забабихина (РФЯЦ-ВНИИТФ),  
г. Снежинск

Защита состоится 22 декабря 2010 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.02 при ГОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет" по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет".

Автореферат разослан 16 ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук



А.О. Чернявский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Решение задач механики удара как раздела теории пластичности при наличии больших деформаций, волновых процессов, разрушения в условиях контакта конструкций с проникающими ударниками сложной структуры остается предметом интенсивного развития уже многие десятилетия.

Современные требования к качеству прогноза последствий удара приводят к необходимости учета множества физических явлений в процессе динамического локального деформирования конструкций, что создает серьезные физические и математические проблемы и не позволяет разработать детализированное аналитическое описание таких процессов для решения инженерных задач по проектированию защитных структур, являющихся объектом данного исследования.

Значительный вклад в развитие экспериментальной базы и теоретических аспектов деформирования и разрушения материалов при ударном нагружении внесли отечественные и зарубежные ученые: Алексеевский В.П., Брагов А. М., Дерибас А.А., Куропатенко В.Ф., Лаврентьев М.А., Наймарк О.Б., Фомин В.М., Армстронг Р., Гопкинсон Б., Джонсон Г., Дэвис Р., Кольский Г., Кук В., Тейлор Г. и многие другие.

В настоящее время разработка и оптимизация защитных конструкций ведется преимущественно экспериментальным путем. Этот путь является весьма затратным (в связи с высокой стоимостью используемых материалов и большим количеством варьируемых параметров) и малоинформативным, так как не дает сведений о кинетике процесса пробивания, о работе отдельных компонентов преграды. Результатами экспериментального исследования являются, как правило, конечные деформированные состояния ударника и преграды и, реже, скорость вылета обломков ударника и преграды.

В связи с этим возникает необходимость перенесения центра тяжести исследований с натурального эксперимента на компьютерный, т.е. на анализ поведения конструкций расчетным путем с использованием возможностей современных численных методов и соответствующих пакетов прикладных программ (LS-DYNA, ABAQUS и др.). Роль натурального эксперимента в этих условиях сво-

дится к проверке и возможному уточнению найденных рациональных параметров.

Следует, однако, отметить, что типовой методики решения динамических контактных задач при локальном нагружении с учетом разрушения элементов защитных конструкций и инденторов пока не существует. Поэтому в каждом конкретном случае эффективное использование современных численных методов требует создания комплекса адекватных геометрических моделей рассматриваемых конструкций, обоснованного выбора математических моделей деформирования и разрушения используемых материалов, связи мод разрушения конструкций с микроструктурой и технологией предварительной пластической и термической обработки, с учетом влияния скорости деформирования на механические свойства материалов, что и определяет актуальность данной работы.

**Цель работы.** Создать комплекс геометрических и математических моделей процесса деформирования и разрушения металлических пластин при высокоскоростном локальном нагружении ударниками со сложной структурой для методического обеспечения процесса проектирования преград заданного уровня защиты.

**Задачи исследования.** Для решения отмеченной цели в работе сформулированы следующие задачи:

1. Разработать метод расчетно-экспериментального определения параметров физической модели упругопластического материала пластины, учитывающей скорость деформирования.

2. Разработать аналитический подход, позволяющий проводить оценку глубины проникновения недеформируемого индентора с учетом геометрии его передней части в пластичную среду.

3. Разработать лабораторный стенд для контактных динамических испытаний пластин.

4. Разработать представления о структуре металлической пластины, учитывающие особенности технологии изготовления и обеспечивающие в расчете (пакет LS-DYNA) получение заданного механизма разрушения – образования пробки с минимизацией дефекта массы.

5. Разработать физическую модель ударника с сердечником из хрупкого материала, учитывающую его разрушение без дефекта массы. Выполнить расчеты взаимодействия стальных пластин с конкретными ударниками при скоростях нагружения до 1000 м/с и сравнить результаты с экспериментальными данными.

6. Разработать новую конструкцию градиентной бронепанели с повышенным сопротивлением пробиванию термически упрочненными сердечниками пуль стрелкового оружия.

**Объект исследования.** Металлическая пластина, подвергнутая высокоскоростному локальному воздействию ударником сложной конструкции. Металл – горячекатаная углеродистая легированная сталь типа 45ХН2МФА с последующей термообработкой до твердости 53...55 HRC, толщина пластины до 6 мм. Ударники сложной конструкции могут иметь массу от одного до десяти граммов, диаметр от 4,5 до 10 мм и содержать кроме оболочки металлический сердечник длиной до 25 мм и твердостью до 65 HRC. В качестве материала для верификации ряда расчетных моделей использован также технический пластилин.

**Методы исследования.** В работе использованы экспериментальные квазистатические и динамические методы исследования механических свойств материалов, а также механизмы разрушения соударяющихся элементов и заградная характеристика – остаточный импульс.

Для проведения расчетных исследований применен известный пакет прикладных программ LS-DYNA, реализующий метод конечных элементов в задачах динамики для анализа неупругого контактного деформирования и разрушения.

**Достоверность** полученных результатов и выводов обеспечивается выбором современных программных пакетов, реализующих метод конечных элементов, экспериментальными исследованиями, проводимыми на современном испытательном оборудовании, сравнением полученных расчетных результатов с результатами экспериментальных исследований других авторов и проводимых в данной работе.

### **Научная новизна работы.**

1. Разработана новая методика экспериментально-расчетного определения параметров модели упругопластического материала для высокопрочных сталей при динамическом нагружении.

2. Предложен новый способ разбиения на конечные элементы для получения механизма разрушения пластин по типу адиабатического сдвига при локальном ударе.

3. Впервые предложена гибридная формулировка для одного тела (Лагранж-Эйлер) для расчета высокоскоростных процессов взаимодействия сложных ударников с высокопрочными стальными пластинами, обеспечивающая минимальный дефект массы.

4. Разработаны две новые конструкции пластин с повышенным сопротивлением действию ударников с длинными закаленными сердечниками, имеющих неоднородную структуру ударной поверхности.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

1. Предложенные аналитические и численные модели и методы расчета динамики локального контактного деформирования и разрушения позволяют проектировать бронезащитные элементы с заданными баллистическими характеристиками, что сокращает объем и стоимость экспериментальной отработки преград.

2. Разработан компактный лабораторный баллистический стенд для разгона сферических ударников, пробоя мишеней и измерения запреградного импульса. Стенд и методика исследований динамических механических свойств материалов используются в научных исследованиях и учебном процессе специальности "Динамика и прочность машин" ГОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет" (ЮУрГУ).

3. Оригинальная конструкция слоистых бронезащитных элементов с использованием полимерных композитных покрытий внедрена в производство индивидуальных бронепреград ба класса защиты.

Результаты исследований используются в ЗАО "ФОРТ Технология" (г. Москва), а также в учебном процессе на специальности "Динамика и прочность машин" (ЮУрГУ), о чем имеются соответствующие документы. Работы по исследованию поведения материалов при интенсивных ударных нагрузках частично финансировались Фондом содействия развитию малых форм пред-

приятый в научно-технической сфере в рамках программы У.М.Н.И.К в 2009-2010гг. (проект №11208 на 2010г).

**Апробация работы.** Работа в целом и ее составные части докладывались на ежегодных научных семинарах кафедры прикладной механики, динамики и прочности машин ЮУрГУ (2004–2010) и научных конференциях:

– на Всероссийской учебно-практической конференции "Применение программного комплекса ANSYS в решении инженерных задач" (2004, г. Уфа);

– на Всероссийских научно-технических конференциях "Динамика машин и рабочих процессов" (2004, 2009, г. Челябинск);

– на Российской межвузовской научно-технической конференции "Компьютерный инженерный анализ" (2005, г. Екатеринбург);

– на микро-симпозиуме в рамках 22nd BEM-FEM Conference "Finite Element Modeling of Textiles and Textile Composites" (2007, г. Санкт-Петербург);

– на XVIII Международной научно-технической конференции "Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов" (2007, г. Обнинск).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика экспериментально-расчетного определения параметров модели упругопластического материала для высокопрочных сталей при динамическом нагружении.

2. Техника конечно-элементного моделирования преград и сложных ударников, основанная на применении двух формулировок конечных элементов (Лагранж-Эйлер) для одного тела для минимизации дефекта массы и учета возможности реализации механизмов разрушения, наблюдаемых на практике.

3. Результаты расчетных и экспериментальных исследований пробоя пластин при взаимодействии с различными ударниками.

4. Две новые конструкции пластин с повышенным сопротивлением действию ударников с длинными закаленными сердечниками, имеющих неоднородную структуру ударной поверхности.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа содержит 168 страниц, 97 рисунков, 9 таблиц. Библиографический список включает 123 источника.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика работы, раскрыта актуальность темы, показана научная новизна и практическая значимость результатов работы.

**В первой главе** проведен анализ открытых литературных источников по следующим вопросам:

*1. Экспериментальные методы определения механических характеристик материалов при высоких скоростях нагружения.*

Наиболее распространенный на данный момент метод разрезных стержней Гопкинсона для динамических испытаний материалов не может быть эффективно применен для изучения механических характеристик современных высокопрочных материалов (например, броневых сталей), поскольку невозможно обеспечить упругость и прочность нагружающего и измерительного стержней при напряжениях в образце до 2,5 ГПа. Данный метод применим для скоростей деформации до  $10^4$  1/с, что на два порядка ниже скоростей деформации, реализующихся при взаимодействии ударника с пластиной со скоростью до 1000 м/с.

Метод испытания по схеме цилиндра Тейлора не позволяет прямым путем получать механические характеристики испытуемого материала. Таким образом, должна быть принята какая-либо модель материала и проведена серия расчетов, в которых определяется деформированное состояние стержня после соударения, и на основе сопоставления расчетного и экспериментально наблюдаемого деформирования стержня подбираются параметры модели, при которых реализуется наилучшее согласие расчета и эксперимента.

Металлические материалы приобретают свои высокие прочностные и деформационные свойства в процессе прокатки и термообработки конкретных изделий – пластин. Это накладывает существенные ограничения на форму и размеры доступных для изготовления образцов и применимость существующих методов определения механических характеристик.

*2. Аналитические подходы к расчету динамического взаимодействия ударника и пластины.*

Большинство аналитических методов основаны на разделении реакции среды, в которую происходит проникновение, на сумму двух составляющих: не



зависящую от скорости удара и пропорциональную квадрату скорости удара. В работах до 1960-х годов в обе эти составляющие входят эмпирические константы. В современных работах (1990–2008 гг.) для вычисления этих составляющих используют решение задачи о расширении сферической полости в упругопластическом полупространстве.

*3. Моделирование методом конечных элементов процесса пробивания пластин высокоскоростными ударниками.*

В настоящее время для решения задач ударного взаимодействия применяют пакеты LS-DYNA, ABAQUS, MSC Dytran, AutoDyna и другие. Для решения задач динамики деформирования металлических материалов при скоростях соударения до 1000 м/с, как правило, используют конечные элементы в формулировке Лагранжа или Эйлера.

Для металлов используют модели Джонсона–Кука, Зерилли–Армстронга, Купера–Саймондса. Наиболее часто используемой моделью материала в широком диапазоне скоростей деформирования в подобных расчетах является модель Джонсона–Кука, учитывающая зависимость текущего напряжения на поверхности текучести от накопленной пластической деформации, скорости деформации и температуры. С этой моделью, как правило, используется критерий разрушения, позволяющий учитывать влияние напряженного состояния, скорости деформирования и температуры на предельную деформацию при разрушении.

*4. Методы повышения сопротивления пробиванию пластин ударниками сложной структуры.*

Основным способом повышения сопротивления металлических пластин пробой высокопрочными ударниками является создание на их лицевой поверхности неоднородностей, вызывающих неравномерное сопротивление на переднем торце ударника, что особенно эффективно против ударников с длинными закаленными сердечниками, поскольку приводит к их скалыванию и последующему излому. Неоднородности реализуют наплавкой проволоки, укладкой шариков малого диаметра, наплавкой ромбовидной сетки и т.д. Основным недостатком таких методов является сложность технологического процесса нане-

сения неоднородностей, а также заметное увеличение толщины и массы стальной пластины.

*На основании выполненного литературного обзора сформулированы отмеченные выше цель и задачи диссертации.*

**Во второй главе** проведены экспериментальные, аналитические и численные расчетные исследования пробивания жестким ударником среды с неограниченной пластичностью.

Экспериментальные исследования проведены на модельном материале, имеющем высокую пластичность и термостабильность – техническом пластилине Roma Plastilina Soft (США), нагружение производили из пневматического пистолета пулями типа ДЦ массой 0,5 г, с измерением начальной и запреградной скоростей. Толщину преград варьировали от 3 до 16 мм.

При обстреле толстых (до 16 мм) пластин из пластилина пулями ДЦ со скоростями 30-60 м/с определяли *глубину погружения* и определяли характеристики текучести  $A$  и  $B$  пластилина в зависимости предела текучести  $\sigma_T$  от скорости деформирования  $\sigma_T = A + B \cdot \dot{\epsilon}$  из условия наилучшего согласия расчетных (LS-DYNA) и экспериментальных глубин погружения.

В программе LS-DYNA проведено численное моделирование процессов пробоя для случаев, реализованных экспериментально. Для полученных ранее параметров упруго-пластической среды ( $A$  и  $B$ ) проведены расчеты *сквозного пробоя* преград с толщинами 3, 7, 11 и 12,5 мм. Среднеквадратичное отклонение расчетной и экспериментальной остаточной скорости после пробоя составило менее 3 м/с для диапазона начальных скоростей 30 – 110 м/с.

В дополнение к численной модели разработана аналитическая модель проникания, в которой получена зависимость реакции идеальной упруго-пластической среды на динамическое проникновение ударника с заостренной носовой частью с учетом ее геометрии. Полагали, что среда состоит из ряда слоев, в каждом из которых материал движется только в радиальном направлении. Реакция среды представлена суммой статической и динамической составляющих. Статическая составляющая определена из решения задачи расширения бесконечно малого отверстия с осью, совпадающей с осью ударника, до диаметра сечения ударника, находящегося в рассматриваемом слое.

Реакция  $F_S$  элементарного слоя толщиной  $dh$  на конус с углом при вершине  $2\alpha$  и радиусом  $R$  сечения, находящегося в текущем слое, равна

$$dF_S = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}} \left( 2 \ln \left( \left( 1 + \frac{\sigma_T}{E\sqrt{3}}(1+\mu) \right) \cdot \frac{0,75 \cdot \mu + 0,61}{\sqrt{\frac{2\sigma_T(1+\mu)}{E\sqrt{3}} + \left( \frac{\sigma_T(1+\mu)}{E\sqrt{3}} \right)^2}} - 1 \right) \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \cdot dh,$$

здесь  $E$  и  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно.

Учет динамики взаимодействия ударника и среды осуществлен путем учета кинетической энергии пластически деформированной части материала среды при движении в радиальном направлении.

Реакция  $F_D$  элементарного слоя толщиной  $dh$  на конус, движущийся со скоростью  $V$ , с плотностью  $\rho$  текущего слоя, равна

$$dF_D = \left( \ln \left( 1 + \frac{(0,75 \cdot \mu + 0,61)^2}{\frac{2\sigma_T(1+\mu)}{E\sqrt{3}} + \left( \frac{\sigma_T(1+\mu)}{E\sqrt{3}} \right)^2} \right) \right) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \operatorname{tg}^3(\alpha) \cdot V^2 \cdot \rho \cdot dh.$$

Для экспериментальных данных из литературы по проникновению стальных неразрушающихся ударников с оживальной носовой частью в алюминиевые мишени, путем интегрирования сил реакции слоев, с учетом профиля ударника, получена зависимость глубины проникновения ударника в бесконечную преграду от его начальной скорости. Для двух типов ударников и материалов мишени получено, что отклонение расчетной глубины от экспериментальной составляет не более 5% для диапазона скоростей удара 300–1200 м/с.

Предлагаемые аналитический и численный подходы могут быть использованы для получения *верхней оценки толщины* пластичной преграды по заданной запреградной скорости при проведении предварительных расчетов комбинированных металло-тканевых защитных преград.

**Третья глава** посвящена разработке методики определения параметров модели материала типа Джонсона-Кука для расчета пробоя стальных пластин в программе LS-DYNA. Использовали модель в следующем виде:

$$\sigma = (a + b \cdot \varepsilon_p^n) (1 + C \cdot \ln(\dot{\varepsilon}_p)) \left( \frac{T_M - T}{T_M - T_0} \right),$$

где  $\sigma$  – интенсивность напряжений на поверхности текучести;  $\varepsilon_p$  – интенсивность накопленной пластической деформации;  $a, b, n, C$  – параметры модели;  $T_0$  – температура, при которой определены параметры модели;  $T_M$  – температура плавления;  $T$  – текущая температура конечного элемента, рассчитываемая из условия перехода энергии, рассеянной при пластическом деформировании, в тепловую энергию.

Работу проводили в два этапа:

- определение параметров, описывающих поверхность текучести, не зависящую от скорости деформирования (статическую)  $a, b, n$ ;
- определение параметра  $C$ , описывающего влияние скорости деформирования на поверхность текучести.

Статические испытания проведены на испытательной машине INSTRON 5882 Научно-образовательного центра "Материаловедение и нанотехнологии" ЮУрГУ. Ударные испытания проведены на специально спроектированном и изготовленном стенде, позволяющем метать сферические ударники диаметром до 8 мм со скоростями до 600 м/с, используя энергию строительного монтажного патрона.

Методика основана на проведении трех независимых экспериментов с последующей математической обработкой и реализована для горячекатаной броневой стали типа 45ХН2МФА толщиной до 6 мм (подвергнутой закалке и низкому отпуску):

- статический трехточечный изгиб до разрушения балок различной ширины, вырезанных из реальных пластин с записью диаграммы "усилие - прогиб" и фоторегистрацией деформированного состояния;
- статическое нагружение сферическим индентором пластины реальной толщины с записью диаграммы "усилие - перемещение";
- динамическое деформирование пластины реальной толщины сферическим ударником с различными скоростями соударения с замером глубины и диаметра отпечатка.

Математическая обработка фотоизображений позволила определить радиус кривизны балки в центре и прогиб, после чего по диаграмме "усилие-прогиб" определяли силу и изгибающий момент, действующий в сечении. Да-

лее, аналитическим путем, получали зависимость изгибающего момента в центре от кривизны и параметров модели материала. По полученной экспериментальной зависимости момента от кривизны определяли параметры модели материала путем минимизации отклонения расчетного изгибающего момента от экспериментального. Получено несколько наборов параметров модели материалов (такого рода обратные задачи, как правило, многоэкстремальны), однако диаграммы деформирования, соответствующие этим параметрам в диапазоне деформации 10–80% отличаются по напряжениям не более чем на 2%. Для выбора набора параметров, соответствующего реальному поведению материала при малых упругопластических деформациях (от 0 до 10%), были проведены испытания по статическому вдавливанию сферического индентора с замером глубины и диаметра отпечатка с последующим численным моделированием.

Для идентификации параметра  $C$  модели, определяющего зависимость напряжения на поверхности текучести от скорости деформирования, проведены эксперименты по динамическому деформированию пластин сферическим индентором с различными скоростями соударения (до 300 м/с). После численного моделирования этих испытаний определено значение параметра, обеспечивающее наилучшее согласие расчета и эксперимента. В экспериментах реализованы расчетные скорости деформирования до  $1,5 \cdot 10^5$  1/с.

В качестве критерия разрушения использовали деформационный критерий, в котором учтено влияние вида напряженного состояния на предельную деформацию при разрушении

$$\varepsilon_F = D_1 \cdot \exp\left(D_2 \frac{\sigma_0}{\sigma_I}\right),$$

где  $\sigma_0$  – первый инвариант тензора напряжений;  $\sigma_I$  – эквивалентное напряжение по теории Мизеса;  $D_1, D_2$  – параметры критерия.

Для определения параметров критерия разрушения, отвечающих за влияние напряженного состояния на *интенсивность деформаций* при разрушении, были испытаны балки различной ширины (от 5 до 20 мм) при реальных толщинах 5...6 мм. В узких балках в опасных точка реализовывалось близкое к одноосному растяжение, в широких – двухосное. Компоненты напряженного состояния для обоих случаев определяли расчетным путем.

Таким образом, предложена методика определения параметров модели материала, учитывающей скорость деформирования, из ряда независимых экспериментов. По этой методике были идентифицированы параметры модели Джонсона–Кука для отмеченной броневой стали. Эти параметры использованы в дальнейших расчетах пробивания пластин ударниками сложной структуры.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы построения сетки конечных элементов (КЭ) и проведения расчетов, обеспечивающих описание экспериментально наблюдаемых *механизмов разрушения* пластин при пробое сложными ударниками, например, пулями автоматического оружия.

Анализ пробоя реальных пластин пулями автоматического оружия показал, что разрушение происходит по механизму образования пробки, что связано с образованием полос адиабатического сдвига.

При конечно-элементном моделировании деформирования и разрушения конструкций с использованием формулировки Лагранжа минимальная энергия, диссипируемая при деформировании, зависит от размеров КЭ. Поэтому для описания такого явления, как полоса адиабатического сдвига, размеры КЭ должны соответствовать реальной ширине полосы сдвига в материале. Для определения ширины полосы адиабатического сдвига были проведены эксперименты по пробое пластин сферическим ударником с выбиванием пробки. После испытаний были сделаны шлифы и проведено травление металла на структуру. Анализ с помощью металлографического микроскопа показал, что ширина полосы, в которой структура металла имеет значительные сдвиговые искажения, составила  $30 \pm 10$  мкм. В дальнейшем минимальный размер конечного элемента в радиальном направлении (от оси, совпадающей с осью ударника) был принят равным 20 мкм.

При ударе в высокопрочную металлическую пластину пули автомата АК–74 с термоупрочненными сердечниками (типа 7Н10) существенно повреждаются, после пробоя от сердечника остается недеформированная задняя часть длиной около 12 мм, передняя часть сердечника "срабатывается", оставляя следы пластических деформаций.

Экспериментальные наблюдения позволяют сформулировать следующие требования к конечно-элементным моделям объектов:

1. Модель пластины должна допускать локализацию сдвиговых деформаций в направлении толщины пластины в областях с линейным поперечным размером, равным ширине полосы адиабатического сдвига.

2. Модель ударника должна описывать разрушение его частей без дефекта массы, который приводит к занижению расчетной пробивающей способности, и иметь возможность описывать деформирование материала при скоростях соударения, больших скорости распространения упругопластической волны.

С учетом сформулированных требований, для численного моделирования пробоя пластины с получением реалистичной картины разрушения была создана конечно-элементная модель, показанная на рисунке 1.

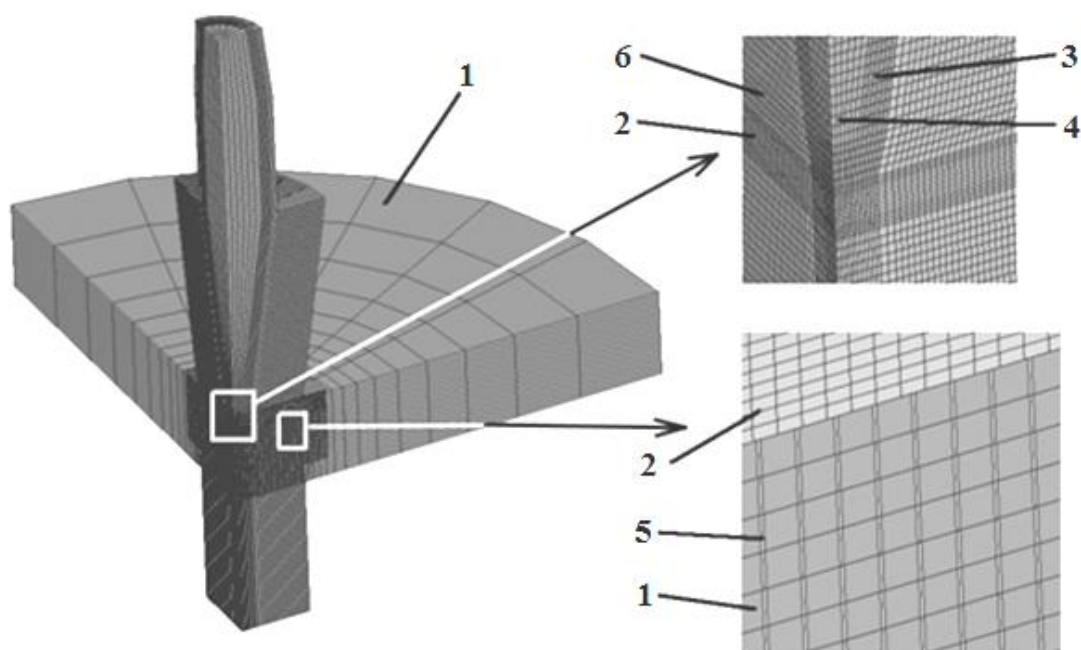


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель и формулировки:

1 – пластина (Лагранж); 2 – пластина (Эйлер); 3 – оболочка пули (Эйлер);  
4 – сердечник пули (Эйлер); 5 – возможные полосы адиабатического сдвига  
(Лагранж) ; 6 – изначально пустой объем (Эйлер)

Пулю, состоящую из термически упрочненного сердечника и оболочки, моделировали конечными элементами в формулировке Эйлера. Для модели пластины использованы обе формулировки: передняя сторона пластины в зоне удара имеет формулировку Эйлера, а тыльная часть пластины – Лагранжа. Эта гибридная формулировка позволяет адекватно описать значительное пластическое деформирование ударной стороны пластины без дефекта массы и контактных неустойчивостей, связанных с разрушением и удалением конечных элементов. Для моделирования полос адиабатического сдвига в конечно-

элементную сетку "лагранжевой" части пластины, введена система концентрических колец из элементов с линейным размером в направлении радиуса, равным ширине полосы адиабатического сдвига (20 мкм) и меньшим, чем размер остальных элементов.

Материал термически упрочненного сердечника является хрупким, но поскольку сердечник работает на сжатие, то использование для него формулировки Лагранжа и какого-либо (любого) критерия разрушения ведет к удалению конечных элементов и значительному дефекту массы (снижая расчетную пробивную способность). В связи с этим использована "Эйлерова" модель сердечника, а его "разрушение" (как прекращение сопротивления деформированию) получено за счет введения термически индуцированной спадающей ветви диаграммы деформирования. Для материала сердечника использована модель Джонсона-Кука, спадающая ветвь диаграммы деформирования получена путем снижения температуры плавления с  $1400^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ , таким образом, при возникновении пластических деформаций с учетом адиабатического саморазогрева, материал размягчается, и диаграмма имеет спадающую ветвь. Зависимость напряжения в элементе при его адиабатическом пластическом деформировании показана на рисунке 2. Максимум напряжений соответствует динамическому пределу прочности при сжатии.

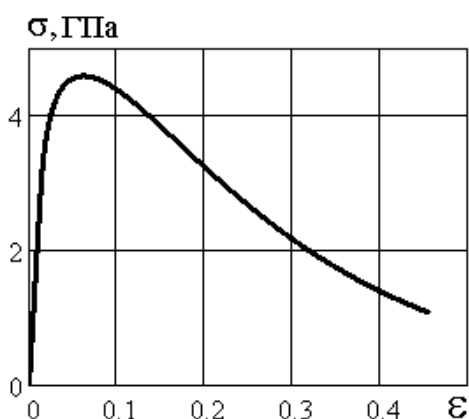


Рисунок 2 – Пример диаграммы деформирования материала сердечника

По результатам моделирования пробоя пластины из отмеченной броневой стали толщиной 5 мм пулей 7Н10 (при скорости соударения 930 м/с) пробка и сердечник пули имеют среднюю скорость 520 м/с, диаметр отверстия в пластине оказался средним между диаметром сердечника и калибром пули. На рисун-



ке 3 приведено распределение концентрации материала сердечника при  $t=20$  мкс (время от начала соударения), там же стрелкой показана выбиваемая пробка, наблюдаемая в эксперименте. Результаты расчета остаточной скорости пробки хорошо согласуются с экспериментальными данными при пробое пластин (различие меньше 20 м/с).

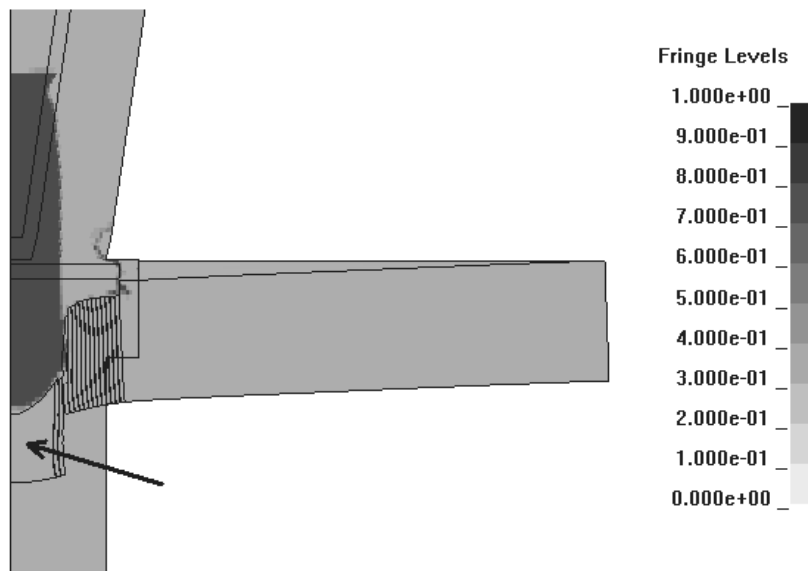


Рисунок 3 – Объемная доля материала сердечника (20 мкс от начала контакта)

В рамках данного подхода была также решена задача пробивания пластины ударником, состоящим из пластичных материалов на примере пули SS109 автоматической винтовки M16 (США). Пуля SS109 имеет пластичный стальной сердечник и свинцовый наполнитель в задней части пули. Пулю моделировали в формулировке Эйлера, параметры модели материала пули были взяты из литературных источников. Результаты расчета пробоя также находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами (различие скоростей вылета пробки не превосходит 25 м/с).

**В пятой главе** предложены способы повышения эффективности защитных преград путем создания неоднородного сопротивления ударнику для более эффективного его разрушения и отклонения от траектории. Предложены два технических решения: 1) создание на лицевой стороне термообработанной пластины зон с твердостью, отличающейся от твердости основного материала пластины; 2) нанесение на лицевую поверхность пластины слоя корундовой полимер-керамики. На оба решения получены патенты РФ.

Для создания зон с отличающейся твердостью предложена технология электродуговой обработки поверхности неплавящимся электродом. Проведены расчеты температурных полей в пластине. По расчетной скорости охлаждения проведено прогнозирование количества мартенсита и твердости материала пластины в обработанной зоне. По известным эмпирическим зависимостям механических свойств от твердости выполнен прогноз механических свойств материала обработанных зон. Проведен расчет пробивания таких пластин пулей 7Н10, из которого следует, что пуля отклоняется от прямой траектории при попадании в пластину по нормали к поверхности, а в сердечнике возникают напряжения, превышающие его предел прочности. При экспериментальном обстреле был подтвержден эффект разворота пули и разрушения сердечника.

Второй варианта усиления пластины представляет собой накладку на металлическую пластину, состоящую из частиц электрокорунда скрепленных между собой полимерным связующим, причем толщина накладки должна обеспечивать размещение частиц как минимум в два слоя. Данную накладку формуют по металлической пластине, после чего скрепляют с последней биндажом. Из электрокорунда фракции 0,8–1,6 мм и эпоксидной смолы были изготовлены экспериментальные наклейки и переданы в ЗАО "ФОРТ Технология" для проведения испытаний. Результаты огневых испытаний пулями Б–32 винтовки СВД показали эффективность предложенного решения. В настоящее время ЗАО "ФОРТ Технология" использует полимеркерамические наклейки в серийном производстве бронежилетов. Таким образом, предложенные варианты позволяют для заданного уровня защиты уменьшить толщину стальной пластины или увеличить уровень защиты при сохранении массы.

**Основные результаты** проведенных в работе теоретических и экспериментальных исследований состоят в следующем:

1. На основе комбинации квазистатических и ударных испытаний (изгиб и индентирование) построена методика определения полного комплекса параметров моделей рассмотренных материалов с ограниченной и неограниченной пластичностью. В качестве материала с неограниченной пластичностью использован модельный материал Roma Plastilina Soft. В качестве материала с ограниченной пластичностью использована сталь Ф-110 (маркировка ЗАО "ФОРТ

Технология"), ориентировочный химический состав – 45ХН2МФА, термообработка – закалка с низким отпускком.

2. Для материала с неограниченной пластичностью проведены расчетные и экспериментальные исследования пробивания ударником с тупой передней частью. Численный расчет проведен в пакете LS-DYNA в осесимметричной постановке с использованием перестраиваемой сетки. Использована модель материала с идентифицированными параметрами. Предложено в модели присоединять к тупому носку ударника конус из материала преграды с углом при вершине  $90^\circ$ , а в модели преграды делать малое отверстие. Такой подход позволил получить пробой преграды без использования алгоритмов разрушения конечных элементов, при этом получено среднеквадратическое отклонение скорости ударника после пробоя менее 3 м/с для диапазона остаточных скоростей 0–90 м/с и диапазона толщин 3–12 мм при диаметре ударника 4,5 мм.

3. Предложен аналитический метод для вычисления силы сопротивления внедрению ударника с учетом геометрии его передней части. Для применения метода необходимо знать только одну эмпирическую константу материала – динамический предел текучести. Сравнение расчетной глубины проникновения длинного неразрушающегося стального ударника в мишени из алюминиевых сплавов с экспериментальными данными, приведенными в литературе, показало хорошее соответствие – отличие глубин проникновения для диапазона скоростей соударения 350 – 1200 м/с не превышает 5%. Данный метод может быть использован для предварительного проектирования преград из пластичных материалов.

4. Предложен новый способ численного моделирования процесса пробоя металлической пластины, основанный на применении различных формулировок конечных элементов (Лагранжа и Эйлера) для одного тела – пробиваемой пластины. Такой способ позволяет избежать существенного искажения сетки конечных элементов непосредственно в месте контакта пластины с ударником, позволяя корректно учесть механические свойства материала пластины в зоне локализованного сдвига. Проведены расчеты процесса пробивания пластины ударником, содержащим высокопрочный сердечник (на примере пули 7Н10), и ударником, состоящим полностью из пластичных материалов (на примере пу-

ли SS109). Результаты расчетов находятся в качественном (вид разрушения) и количественном согласии с экспериментальными результатами. Отличие расчетных скоростей обломков ударников и пластины после пробоя от экспериментальных не превышает 5%, отличие в длине недеформированной части сердечника не превышает 20%.

5. Предложен способ моделирования хрупкого материала термически упрочненных сердечников ударников при ударе по нормали к пластине. Способ основан на применении термически индуцированной спадающей ветви диаграммы деформирования в модели материала сердечника (искусственное задание пониженной температуры плавления). Сочетание такой модели материала и конечных элементов в формулировке Эйлера позволило проводить расчет с учетом изменения геометрии сердечника в процессе удара без дефекта его массы.

6. Разработан компактный лабораторный баллистический стенд для разгона сферических ударников, пробоя мишеней и измерения запреградного импульса. Стенд и методика исследований динамических механических свойств материалов используются в научных исследованиях и учебном процессе специальности "Динамика и прочность машин" ЮУрГУ.

7. Предложена оригинальная конструкция слоистых бронезащитных элементов с использованием полимерных композитных покрытий, которая защищена патентом РФ и внедрена в производство средств индивидуального бронирования ба класса защиты.

#### **Публикации по теме диссертации.**

*Статьи, опубликованные в журналах из списка ВАК:*

1. Форенталь, М.В. Динамика локального деформирования и разрушения металлической пластины / М.В. Форенталь // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Машиностроение". – 2009. – № 33. – С. 4-11.

2. Форенталь, М.В. Численное решение задачи пенетрации металлической преграды в гибридной формулировке / М.В. Форенталь // Вестник компьютерных и информационных технологий. – М., 2009. – № 12. – С. 29-34.

*Патенты:*

3. Пат. 2390718 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> F 41 Н 1/02, В 82 В 1/00.

Броневого элемента для бронезилов для защиты от пуль с термически упрочненным сердечником / С.Б. Сапожников, С.А. Сахаров, М.В. Форенталь. – № 2008140224/02; заявл. 09.10.08; опубл. 27.05.10.

4. Пат. 49968 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 41 H 1/02. Бронезилет / С.Б. Сапожников, С.А. Сахаров, М.В. Форенталь. – № 2004136730/22; заявл. 14.12.04; опубл. 10.12.05.

*Другие публикации:*

5. Форенталь, М.В. Идентификация параметров модели материала, учитывающей скорость деформирования / М.В. Форенталь // Наука и технологии: тр. XXVI Российской школы. – М.: РАН, 2006. – Т. 1. – С. 62-67.

6. Сапожников, С. Б. Движение тела вращения в упругопластической среде / С. Б. Сапожников, М. В. Форенталь // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докл. на Всероссийской научно-технической конференции: 13-15 октября 2004 г. – Челябинск, 2005. – С. 139-141.

7. Сапожников, С. Б. Идентификация параметров модели материала расчетно-экспериментальным методом с использованием пакетов ANSYS и LS-DYNA / С. Б. Сапожников, М. В. Форенталь // Мировое сообщество: проблемы и пути решения: сб. науч. ст. – Уфа, 2004. – №15. – С. 52-55.

8. Сапожников, С. Б. Моделирование откольного разрушения материала при локальном высокоскоростном ударе в пакете LS-DYNA / С. Б. Сапожников, М. В. Форенталь // Вестник УГТУ–УПИ. Компьютерный инженерный анализ. – Екатеринбург, 2005. – №11(63). – С. 97-102.

9. Сапожников, С. Б. Определение динамического предела текучести методом индентирования листовых образцов / С. Б. Сапожников, М. В. Форенталь // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докл. на Всероссийской научно-технической конференции: 13-15 октября 2004 г.– Челябинск, 2005.– С.137-138.

10. Сапожников, С.Б. Проектирование неоднородных преград повышенной эффективности / С. Б. Сапожников, М. В. Форенталь // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докл. на Всероссийской научно-технической конференции: 8-10 декабря 2009 г. – Челябинск, 2009. – С. 165-168.

11. Сапожников, С.Б. Численное моделирование и оптимальное проектирование композитных защитных структур / С. Б. Сапожников, М. В. Форенталь // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб. тез. докл. на XVIII Международной научно-технической конференции – Обнинск, 2007. – С. 221-224.

12. Sapozhnikov, S.B. Improved methodology for ballistic limit and blunt trauma estimation for use with hybrid metal/textile body armor / S.B. Sapozhnikov, M.V. Forental, N.Yu. Dolganina // Finite element modelling of textiles and textile composites: proceeding of conference. – St-Petersburg, 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Подписано в печать 11.11.2010 г.  
Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага ВХИ 80 гр. Объем 1,1 усл. п. л.  
Тираж 100 экз. Заказ №1955

Изготовлено в полном соответствии с качеством  
предоставленных оригиналов заказчиком  
в ООО «РЕКПОЛ», 454048, г. Челябинск, пр. Ленина, 77,  
тел.(351) 265-41-09, 265-49-84