На правах рукописи

Collin

Шпаков Сергей Сергеевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МЕТАЛЛО-ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск - 2010

Работа выполнена на кафедре механики деформируемого твердого тела Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Томский государственный университет".

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, снс Зелепугин Сергей Алексеевич
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, снс Герасимов Александр Владимирович доктор физико-математических наук, снс Черепанов Олег Иванович
Ведущая организация:	Учреждение Российской академии наук Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл.

Защита состоится 24 декабря 2010 года в 14 часов 30 мин. 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 Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан 23 ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук

Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Перспективное развитие различных областей техники, связанных с динамическими условиями нагружения, в значительной степени зависит от создания и широкого применения новых материалов с комплексом заданных физико-механических свойств, разработка которых в последнее время получила мощный импульс. Оптимальные эксплуатационные свойства большинства современных конструкций можно получить при условии применения составных элементов из слоистых композиционных материалов. В последние годы в качестве нового перспективного легкого прочного материала рассматривается металло - интерметаллидный слоистый композит (МИСК). Создание технологий получения таких материалов, методов лабораторных испытаний и компьютерного моделирования механического поведения при динамическом нагружении актуально для развития современного материаловедения.

Поведение МИСК в условиях высокоскоростного удара представляет собой актуальную проблему. В настоящее время исследованиям поведения данных композитов при динамическом нагружении в научной литературе посвящено только несколько работ экспериментального характера [1, 2]. При этом в ходе экспериментов не удается выявить последовательность, время действия и вклад различных механизмов разрушения в развитие областей повреждений в композиционной преграде. Поэтому при анализе поведения МИСК особенно возрастает роль численного моделирования, которое позволяет в рамках единого математического подхода исследовать процесс высокоскоростного нагружения композиционных преград в широком диапазоне начальных условий. Кроме того, необходимо разработать модели механического поведения материалов для включения в крупномасштабные компьютерные коды для обеспечения точности и эффективности прогнозирования характеристик и функциональных возможностей металло – интерметаллидных слоистых композитов.

Актуальность исследований обусловлена потребностью в прогнозировании деформации и разрушения перспективных защитных элементов из металло - интерметаллидных слоистых композитов при динамическом нагружении.

Цель работы

Целью диссертационной работы является установление закономерностей механического поведения многослойных металло - интерметаллидных слоистых композитов при динамическом нагружении деформируемыми ударниками.

Задачи, решаемые для достижения цели

1. Создание физико-математической модели для исследования механического поведения многослойных металло-интерметаллидных композитов при динамических воздействиях.

- Модификация физико-математической модели, описывающей процессы разрушения плотных хрупких материалов в условиях ударно-волнового нагружения для широкого диапазона воздействий.
- Численное исследование осесимметричного динамического взаимодействия ударника с композиционными преградами нескольких типов, выявление особенностей деформирования и разрушения металлокерамических, стеклокерамических и многослойных металлоинтерметаллидных преград.
- Определение прочностных характеристик стеклокерамического образца в сравнении с высокопрочными керамическими, оценка возможности ее использования в элементах баллистической защиты.
- 5. Исследование деформации и разрушения многослойных металлоинтерметаллидных композиционных преград, состоящих из чередующихся слоев интерметаллид Al₃Ti – титановый сплав BT6, при осесимметричном динамическом взаимодействии с ударником из вольфрамового сплава. Сравнение механического поведения МИСК преград с однородными. Определение эффективного соотношения толщин слоев интерметаллид / металл.

Научная новизна работы

- 1. Создана физико-математическая модель для численного анализа механического поведения многослойных металло-интерметаллидных композитов при динамических воздействиях, использующая модель разрушения плотных хрупких материалов.
- 2. Численно исследован процесс разрушения стеклокерамического образца и металлокерамической композиции из слоя керамики на основе карбида бора и слоя из титанового сплава ВТ4, при ударе по ним стальным высокопрочным ударником с начальной скоростью 760 м/с. Установлено, что стеклокерамика, в отличие керамики на основе карбида бора, обладает относительно низкими прочностными характеристиками.
- 3. Впервые численно исследованы особенности деформирования и разрушения многослойных металло-интерметаллидных композиционных преград, состоящих из чередующихся слоев интерметаллид Al₃Ti титановый сплав BT6, при ударе по нему ударником из вольфрамового сплава с начальной скоростью до 1000 м/с. Установлено, что разрушение слоев композиционной преграды идет по различным преобладающим механизмам хрупкому (слой интерметаллида) и пластичному (слой металла). Показана высокая стойкость композиционных преград к ударно-волновому нагружению по сравнению с однородными преградами. Найдено соотношение толщин слоев интерметаллид / металл, при котором многослойная композиционная металло-интерметаллидная преграда оказывается наиболее эффективной к динамическому воздействию.

Достоверность полученных результатов обеспечивается: физической и математической корректностью постановок задач, апробированностью выбранного метода их решения, выбором в каждом конкретном случае адекватной расчетной сетки, обеспечивающей сходимость решения, контролем в процессе численного счета выполнения законов сохранения, сравнением с экспериментальными результатами, полученными другими авторами.

Практическая и теоретическая значимость работы

Полученные теоретические результаты, расширяющие знания о физике и механике процессов разрушения многослойных металло-интерметаллидных композиционных преград при ударно-волновом нагружении, необходимы для обработки экспериментальных данных и развития математических моделей, для исследования закономерностей такого быстропротекающего процесса. Полученные результаты внедрены и используются в Томском государственном университете, Томском научном центре СО РАН.

Связь работы с научными программами и темами

Диссертация выполнялась по программе Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/5993), Президиума РАН (проект 18.7 в рамках комплексной Программы фундаментальных исследований по направлению «Теплофизика и механика интенсивных энергетических воздействий»), Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 07-08-00037, 10-08-00516), РФФИ - Администрация Томской области (проекты 05-03-98001, 09-08-99059).

Основные положения, выносимые на защиту

- Физико-математическая модель, описывающая процессы динамического деформирования и разрушения многослойных металлоинтерметаллидных композитов при взаимодействии с деформируемыми ударниками при скоростях до 1000 м/с.
- 2. Модель разрушения плотных хрупких материалов в условиях ударноволнового нагружения.
- Закономерности деформации и разрушения стеклокерамических и металлокерамических преград при осесимметричном взаимодействии с деформируемыми ударниками, свидетельствующие о возможности применения стеклокерамики в составе защитных конструкций.
- 4. Комплекс результатов численного исследования механического поведения многослойных металло-интерметаллидных композиционных преград, состоящих из чередующихся слоев интерметаллид / титановый сплав, при осесимметричном динамическом взаимодействии с ударником из вольфрамового сплава, свидетельствующие о высокой эффективности МИСК преград.

Личный вклад автора

При выполнении диссертационной работы личный вклад автора состоял в физико-математической постановке задач, разработке и численной реализации моделей поведения сред, проведении численных расчетов, анализе полученных результатов, обосновании научных рекомендаций.

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на 15 Всероссийской и Международной конференциях и симпозиумах:

1. Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона» (НПО-2005), г. Новосибирск, 2005 г.

2. Всероссийская научная конференция «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2005), г. Новосибирск, 2005 г.

3. VI Международная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», посвященная 105-летию со дня рождения академика М.А. Лаврентьева. г. Новосибирск, 2005 г.

4. XXI Международная конференция «Уравнения состояния вещества», Эльбрус, 2006 г.

5. V Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 2006 г.

6. Международная конференция IX Харитоновские тематические научные чтения. «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», г. Саров, 2007 г.

7. XXII Международная конференция «Физика экстремальных состояний вещества», Эльбрус, 2008 г.

8. Международная конференция «Ударные волны в конденсированных средах», г. Санкт-Петербург, 2008 г.

9. Всероссийская конференция по математике и механике, Томск, 2008 г.

10. V Всероссийская конференция молодых ученых "Физика и химия высокоэнергетических систем", г. Томск, 2009 г.

11. Всероссийская конференция «Современная баллистика и смежные вопросы механики», посвященная столетию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя Томской школы баллистики, г. Томск, 2009 г.

12. Х Международная конференция «Забабахинские научные чтения», г. Снежинск, 2010 г.

13. Всероссийская молодежная научная конференция Томского государственного университета "Современные проблемы математики и механики", г. Томск, 2010 г.

14. International Conference "Shock Waves in Condensed Matter", St. Petersburg - Novgorod, Russia, 2010 г.

15. 8th International Conference «New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter», Paris, France, 2010 Γ .

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 18 печатных работах, из них 2 – статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, 10 – статьи в сборниках трудов, материалах Всероссийских и Международных конференций, 6 – тезисы докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения. Общий объем работы 132 страницы, включая 57 рисунков, 7 таблиц, 137 библиографических ссылок в списке использованной литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, научная новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

<u>Раздел 1.</u> Металло-интерметаллидные слоистые композиционные материалы (1.1. Область применения слоистых композиционных материалов; 1.2. Способы получения слоистых композиционных материалов; 1.3. Прочностные характеристики металло-интерметаллидных слоистых композитов).

Первый раздел работы посвящен обзору работ по областям применения слоистых композиционных материалов (СКМ), способам их получения, полученным оценкам прочностных характеристик одного из наиболее современных видов СКМ - многослойного металло-интерметаллидного слоистого композита (МИСК). Уникальные свойства металло интерметаллидных слоистых композитов являются результатом комбинации высокой твердости и жесткости интерметаллидных слоев и слоев металлических сплавов с высокой прочностью, трещиностойкостью и пластичностью. Основное внимание уделено титан - алюминид титановым композитам. В случае слоистых композитов Ti-Al₃Ti удельная жесткость (модуль/плотность) почти вдвое выше, чем у стали, удельная ударная вязкость и удельная прочность являются сравнимыми или выше, чем почти у всех металлических сплавов, а удельная твердость коррелирует со многими керамическими материалами.

<u>Раздел 2.</u> Физико-математические модели и численные алгоритмы расчета динамического взаимодействия деформируемых твердых тел (2.1. Система уравнений для описания нестационарных адиабатических движений упругопластической среды с учетом кинетики повреждения материалов и тепловых эффектов; 2.2. Соотношения метода конечных элементов для решения осесимметричной задачи соударения; 2.3. Моделирование динамического взаимодействия цилиндрического тела с жесткой стенкой в двумерной постановке).

Во втором разделе диссертации представлена система уравнений для описания нестационарных адиабатических движений упругопластической среды с учетом разрушения и тепловых эффектов. В работе используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся наличием микрополостей (пор, трещин). В элементарном объеме среды W конденсированная фаза занимает объем W_c и характеризуется плотностью ρ_c , микрополости

(пустоты) занимают объем W_f , в которых плотность материала полагается равной нулю. Средняя плотность повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением $\rho = \rho_c$ (W_c/W). Степень поврежденности среды характеризуется удельным объемом микроповреждений $V_f = W_f / (W\rho)$. Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатические (как при упругом, так и при пластическом деформировании) движения прочной сжимаемой среды с учетом зарождения и эволюции микроповреждений состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии, скорости изменения удельного объема микроповреждений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \upsilon) = 0 , \qquad (1)$$

$$\frac{\rho d\upsilon_i}{dt} = \sigma_{ij,j} , \qquad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} , \qquad (3)$$

$$\frac{d V_{f}}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |P_{c}| \le P^{*} \text{ или } (P_{c} > P^{*} \text{и } V_{f} = 0) \\ -\operatorname{sign}(P_{c}) K_{f}(|P_{c}| - P^{*})(V_{2} + V_{f}), & , \quad (4) \\ & \text{если } P_{c} < -P^{*} \text{ или } (P_{c} > P^{*} \text{и } V_{f} > 0) \end{cases}$$

где ρ - плотность, t – время, υ - вектор скорости с компонентами υ_i , σ_{ij} = - $P\delta_{ij}+S_{ij}$ - компоненты тензора напряжений, S_{ij} - компоненты девиатора напряжений, $P = P_c(\rho/\rho_c)$ - среднее давление, P_c - давление в сплошной компоненте вещества, E - удельная внутренняя энергия, ε_{ij} - компоненты тензора скоростей деформаций, $P^* = P_k V_l/(V_f+V_l)$; V_l , V_2 , P_k , K_f - экспериментально определяемые константы.

Моделирование разрушений проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа, определяющей рост микроповреждений, непрерывно изменяющих свойства материала и вызывающих релаксацию напряжений. Давление в неповрежденном веществе является функцией удельного объема и удельной внутренней энергии и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена:

$$\begin{split} P_c &= \rho_0 a^2 \mu + \rho_0 a^2 [1 - \gamma_0 / 2 + 2(b - 1)] \ \mu^2 + \\ &+ \rho_0 a^2 [2(1 - \gamma_0 / 2)(b - 1) + 3(b - 1)^2] \ \mu^3 + \gamma_0 \rho_0 E \end{split},$$

где $\mu = V_0/(V-V_f)-1$, γ_0 - коэффициент Грюнайзена, V_0 и V - начальный и текущий удельные объемы, а и b - константы адиабаты Гюгонио. Определяющие соотношения имеют вид:

$$2G\left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}\delta_{ij}\right) = \frac{dS_{ij}^0}{dt} + \lambda S_{ij}$$

где $dS^0_{ij}/dt\,$ - производная по Яуманну, определяемая формулой:

$$\frac{\mathrm{d}S_{ij}^{0}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}S_{ij}}{\mathrm{d}t} - S_{ik}\omega_{jk} - S_{jk}\omega_{ik}$$

1

причем $2\omega_{ij} = \partial \upsilon_i / \partial x_j - \partial \upsilon_j / \partial x_i$. Параметр λ тождественно равен 0 при упругой деформации, а при наличии пластической - определяется с помощью условия текучести Мизеса:

$$S_{ij}S_{ij} = \frac{2}{3}\sigma^2.$$

В приведенных выше формулах G - модуль сдвига, σ - динамический предел текучести, которые определяются согласно соотношениям:

$$\begin{split} & G = G_0 \ K_T \left(1 + \frac{cP}{(1+\mu)^{1/3}} \right) \frac{V_3}{(V_f + V_3)} \\ & \sigma = \begin{cases} \sigma_0 \ K_T \left(1 + \frac{cP}{(1+\mu)^{1/3}} \right) \left(1 - \frac{V_f}{V_4} \right) \ , \ \text{если} \ V_f \leq V_4 \\ & 0, \ \text{если} \ V_f > V_4 \end{cases} , \ (5) \\ & K_T = \begin{cases} 1 \ , & \text{если} \ T_0 \leq T \leq T_1 \\ \frac{T_m - T_1}{T_m - T_1} \ , \ \text{если} \ T_1 < T < T_m \ . \\ & 0 \ , & \text{если} \ T \geq T_m \end{cases} \end{split}$$

 $[0, если 1 \ge 1_m$ Здесь T_m - температура плавления, с, V_3 , V_4 , T_1 - константы. Выбор функции $K_T(T)$ осуществлялся с целью моделировать атермический характер пластического деформирования, наблюдаемый экспериментально при скоростях деформирования 10^4 с⁻¹ и выше [3].

Для вычисления температуры использовались соотношения:

$$dT = \begin{cases} d(E - E_{0x})/c_{p}, & \text{если } T < T_{m} \\ 0, & \text{если } T = T_{m}, \\ d(E - E_{0x} - \Delta H_{m})/c_{p}, & \text{если } T > T_{m} \end{cases}$$

где удельная теплоемкость с_р возрастает линейно с ростом температуры до температуры плавления вещества:

$$c_{p} = \begin{cases} c_{p}^{0} + \frac{c_{p}^{L} - c_{p}^{0}}{T_{m} - T_{0}} (T - T_{0}), & \text{если } T_{0} \leq T < T_{m} \\ c_{p}^{L} , & \text{если } T \geq T_{m} \end{cases}$$

а холодная составляющая удельной внутренней энергии E_{0x} определяется выражением:

$$E_{0x} = \begin{cases} E_0 , & \text{если } \xi < 0 \\ E_0 + E_1 \xi + E_2 \xi^2 + E_3 \xi^3 + E_4 \xi^4 , & \text{если } \xi \ge 0 \end{cases},$$

где $\xi = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}$, ΔH_m - удельная теплота плавления, c_p^0 и c_p^L - константы материала, $E_0 = -T_0 c_p^0$, $E_1 = \gamma_0 E_0$, $E_2 = (a^2 + \gamma_0^2 E_0)/2$, $E_3 = (4ba^2 + \gamma_0^3 E_0)/6$, $E_4 = (-2\gamma_0 ba^2 + 18a^2b^2 + \gamma_0^4 E_0)/24$, T_0 - начальная температура.

В работе используется модель разрушения эрозионного типа для описания разрушения материала, имеющего место в области интенсивного взаимодействия и деформирования контактирующих тел, разработанная основе анализа экспериментальных данных. В таких областях давления, как правило, положительные (сжимающие) и модель разрушения «на разрыв» (4) в них не работает. В качестве критерия «сдвигового» (эрозионного) разрушения материала, используется критическое значение удельной энергии сдвиговых деформаций. Текущее значение этой энергии Е_{sh} вычисляется с помощью формулы

$$\rho \frac{dE_{sh}}{dt} = S_{ij} \varepsilon_{ij} \,.$$

Критическая величина удельной энергии сдвиговых деформаций зависит от прочностных характеристик материала, условий взаимодействия и задается функцией начальной скорости удара

$$E_{sh}^{c} = a_{sh} + b_{sh}v_0,$$

где a_{sh} , b_{sh} - константы модели.

Когда $E_{sh} > E_{sh}^{c}$ в расчетной ячейке в области контактных границ, эта

ячейка считается разрушенной и удаляется из дальнейшего расчета, а параметры соседних ячеек корректируются с учетом законов сохранения. Корректировка заключается в удалении массы разрушенного элемента из масс узлов, принадлежавших этому элементу, с целью удовлетворить законам сохранения массы и энергии остающегося в расчете массива расчетных узлов. Если при этом масса какого-либо узла становится нулевой, то данный узел считается разрушенным и также удаляется из дальнейшего расчета.

При формулировке краевой задачи для приведенной системы уравнений определяются начальные и граничные условия, соответствующие физической постановке задачи.

Приведены соотношения метода конечных элементов для решения осесимметричной задачи соударения деформируемых твердых тел.



0 мкс 20 мкс 00 мкс
Рис. 1. Конфигурации стального цилиндрического ударника при ударе по жесткой стенке с начальной скоростью 400 м/с.

Таблица 1. Сталь.								
N⁰	υ ₀ , м/с	σ, ГПа	l_{κ}/l_0		%			
			расчет	эксп.				
1	250	0.8	0.790	0.808	2.2			
2	250	1.2	0.829	0.837	1.0			
3	400	0.8	0.572	0.590	3.1			
4	600	0.8	0.328	0.334	1.8			

В качестве теста численной методики в двумерной постановке была
рассмотрена задача динамического взаимодействия цилиндрического тела с
жесткой стенкой (задача Тейлора) при вариации материала тел (алюминий,
сталь) и скоростей удара. На рис. 1 представлены результаты одного из
расчетов - удар с начальной скоростью 400 м/с. В табл. 1 приведены
полученные численные результаты для стали в сравнении с
экспериментальными данными. Наблюдается хорошее их согласие для
отношения конечной длины цилиндра к начальной.

<u>Раздел 3.</u> Численное исследование разрушения керамических и металлокерамических преград при динамическом нагружении (3.1. Модель разрушения керамических материалов широкодиапазонного типа; 3.2. Численное моделирование разрушения металлокерамической преграды при ударно-волновом нагружении; 3.3. Разрушение стеклокерамических преград при динамическом нагружении).

Для моделирования разрушения керамических материалов при высокоскоростном ударном нагружении в работе используется модель, описывающая поведение плотных хрупких материалов как при относительно низких скоростях нагружения (скорости удара порядка сотен м/с), так и при высоких (порядка тысяч м/с). Модель включает в себя кинетическую модель разрушения активного типа (4), учитывает возможность разрушения керамики при превышении в ударной волне предела упругости Гюгонио (HEL), использует степенную зависимость прочностных характеристик от достигнутого уровня поврежденности, описывающую падение прочностных свойств (динамического предела текучести) при заданном значении удельного объема трещин:

$$y = \begin{cases} y_0 P_f K_T \left(1 + \frac{cP}{(1+m)^{1/3}} \right) \left(1 - \frac{V_f}{V_4} \right), \text{ если } V_f < V_f^k \\ y_f K_T, \text{ если } V_f^k \le V_f < V_4 \\ 0, \text{ если } V_f \ge V_4 \\ P_f = \begin{cases} 1, & \text{если } y_{sh} < y_{HEL} \\ P_f^k, & \text{если } y_{sh} \ge y_{HEL} \end{cases},$$
(6)

где σ_{sh} - напряжение в ударной волне, V_f^k , σ_f , P_f^k , σ_{HEL} – константы.

В зависимости от величины P_f^k может моделироваться хрупкий характер разрушения керамики в ударной волне ($P_f^k \approx 0$), пластический ($P_f^k \approx 1$), промежуточный, совмещающий пластический и хрупкий механизмы деформирования.

На этапе тестирования модели проводились сравнения с экспериментальными данными, полученными в Sandia National Laboratories (Albuquerque, New Mexico, USA) [4]. Численно исследовалась следующая задача: взаимодействие ударника - керамической пластины из карбида бора (B₄C) толщиной 3.917 мм, диаметром 69.2 мм, с керамической пластиной (исследуемым образцом) также из карбида бора толщиной 9.033 мм, диаметром 69.2 мм. Находящееся позади образца окно из фторида лития было толщиной 25.4 мм и диаметром 69.2 мм (рис. 2). Начальная скорости удара варьировалась в диапазоне 500 - 2500 м/с.



 0.5 мкс
5.5 мкс
Рис. 2. Расчетные конфигурации сборки ударник - керамическая пластина - окно из LiF и поля скоростей в них для начальной скорости удара 2210 м/с.



Полученные расчетные профили скоростей контактной поверхности керамический образец - окно из фторида лития находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с данными экспериментов.

С целью оценки прочностных характеристик металлокерамического образца, состоящего из слоя высокопрочной керамики B_4C и слоя титанового сплава BT4, на баллистическом стенде НИИ ПММ ТГУ были проведены тестовые испытания. В табл. 2 представлены результаты экспериментальных исследований. Условия были следующие. Оружие - карабин СКС, штатный патрон Б – 7.62, расстояние до мишени ~0.5 м, $v_0 = 760 \pm 3$ м/с. Мишень – массивная алюминиевая плита, на которую наклеивается испытуемый образец. В качестве испытуемых образцов брались оксид алюминия Al_2O_3 (опыт 2), металлокерамическая сборка из карбида бора на пластине из титанового сплава (опыт 3). Для сравнения в

опыте 1 выстрел производился непосредственно по алюминиевой плите. Результаты экспериментов показывают, что в обоих случаях керамический образец разрушается на фрагменты.

N⁰	образец	Толщина, мм	т, г	ρ, г/см ³	Результат испытания
1	Отсутствует	-	-	-	Кратер в плите глубиной 36 мм
2	Al ₂ O ₃	7.2	58.4	3.8	След на плите, макс. глубина около 1 мм
3	Сборка В ₄ С – ВТ4	B ₄ C – 5.8, BT4 - 3	Суммарная - 60.5	B ₄ C – 2.44, BT4 – 4.5	Вмятина на плите диаметром 20 мм, максимальная глубина 1 мм
4	Стекло- керамика	9.4	60.2	2.58	Кратер в плите глубиной 6 мм
5	Стекло- керамика	9.4	60.2	2.58	Кратер в плите глубиной 8.5 мм

Таблица 2. Результаты экспериментальных испытаний.

С целью тестирования численной методики в расчетах моделировалось взаимодействие цилиндрического ударника диаметром $d_0 = 6$ мм, длиной 27.8 мм, с преградой диаметром 80 мм, толщиной 60 мм из алюминиевого сплава, при ударе по нормали со скоростью 760 м/с. Результаты расчетов показывают, что конечная глубина внедрения ударника в преграду равна 34.2 мм. Это значение хорошо коррелирует с экспериментом (табл. 2, опыт 1). Расхождение результатов составляет 5%.

В расчетах моделировался аналогичный удар по преграде суммарной толщиной 68.8 мм, состоящей из слоя керамики (на основе B_4C) толщиной 5.8 мм и диаметром 43.5 мм, слоя из титанового сплава BT4 толщиной 3.0 мм и диаметром 50 мм, и массивного слоя из алюминиевого сплава толщиной 60 мм и диаметром 80 мм.

Результаты расчетов (рис. 4) показывают, что в данных условиях соударения ударник деформируется и разрушается, его длина значительно сокращается по отношению к первоначальной. Процесс соударения сопровождается деформацией и последующим разрушением керамического слоя, формированием относительно небольшого кратера в массивной преграде из алюминиевого сплава, а также деформацией, разрушением и торможением ударника. Максимальная глубина вмятины в алюминиевой преграде составила около 1 мм, что соответствует экспериментальному значению (табл. 2, опыт 3). Исследованный временной интервал процесса соударения заканчивается отскоком ударника от преграды.



Рис. 4. Конфигурации ударника и трехслойной преграды (0 и 60 мкс).



На рис. 5 для моментов времени 15 (а) и 60 мкс (б) представлены распределения удельного объема микроповреждений во взаимодействующих телах. Результаты расчетов показывают, что в керамике к моменту времени 15 мкс формируются зоны повреждений во всем слое. На тыльной стороне слоя из титанового сплава формируются области поврежденности вблизи оси симметрии. К моменту времени 30 мкс в слое керамики удельный объем микроповреждений, а также область повреждения на тыльной стороне из сплава титана увеличивается; длина ударника уменьшилась практически в два раза. Кроме того, возникает зона поврежденности в основной преграде. В момент времени 60 мкс на рис. 5 отчетливо видно, что в области непосредственного соударения уровень поврежденности слоя керамики возрастает с тенденцией к образованию

магистральных трещин и полному разрушению слоя в последующем, что качественно соответствует экспериментальным данным.

С целью оценить динамику деформирования и разрушения стеклокерамики были проведены численные расчеты с использованием модели разрушения (6). В расчетах моделировалось взаимодействие рассмотренного ранее цилиндрического ударника с преградой диаметром 80 мм, суммарной толщиной 69 мм, состоящей из слоя стеклокерамики толщиной 9 мм и слоя алюминия толщиной 60 мм.



Рис. 6. Конфигурации ударника и двуслойной преграды (стеклокерамика + алюминий) в моменты времени 0 и 120 мкс.

На рис. 6 представлены конфигурации ударника и преграды. Результаты расчетов показывают, что в данных условиях соударения ударник практически не деформируется, сохраняя форму, близкую к первоначальной, что обусловлено существенным различием прочностных характеристик материала взаимодействующих тел. Процесс внедрения сопровождается разрушением и пробитием слоя стеклокерамики, деформированием и разрушением материала основной части преграды в области взаимодействия, формированием в ней кратера глубиной 7.1 мм (1.2d₀), что соответствует экспериментальным данным (табл. 2, опыты 4, 5). Исследованный временной интервал процесса соударения заканчивается отскоком ударника от преграды, а также отлетом оставшейся части лицевого стеклокерамического слоя преграды от ее массивного тыльного слоя и тенденцией к полному макроразрушению стеклокерамического слоя, что качественно соответствует экспериментальным данным.

Результаты исследований показывают, что стеклокерамика обладает относительно низкими прочностными характеристиками, а ее использование в элементах защиты может быть обусловлено простотой производства, низкой стоимостью, малым весом.

<u>Раздел 4</u>. Численное моделирование разрушения многослойных металло-интерметаллидных композитов при динамическом нагружении (4.1. Численное моделирование разрушения многослойной титан - алюминид титановой преграды при динамическом нагружении; 4.2. Определение эффективности многослойных металло-интерметаллидных композитов при вариации толщин слоев; 4.3. Сравнение особенностей разрушения металло-интерметаллидных композитов с металлическими и керамическими преградами).

Численно в осесимметричной постановке моделировался процесс динамического взаимодействия цилиндрического ударника из вольфрамового сплава 93W-7FeCo с преградой, состоящей из 17 композиционных слоев, каждый из которых состоял из слоя интерметаллида Al₃Ti и слоя металла – титанового сплава BT6.



Рис. 7. Конфигурации ударника и металло-интерметаллидной 17-слойной преграды.



Рис. 8. Поля удельного объема микроповреждений V_f в см³/г (а) и удельной энергии сдвиговых деформаций Е_{сдв} в кДж/кг (б) во взаимодействующих телах (60 мкс).

Суммарная толщина преграды составила 19.89 мм. Ударник радиусом 3.075 мм, длиной 23 мм был с конической головной частью. Угол раствора конуса ударника был задан 50⁰, начальная скорость удара составила 900 м/с. В ходе исследований были рассмотрены следующие варианты:

1 - преграда из 17 слоев, толщина слоя Al₃Ti - 0.94 мм, ВТ6 - 0.23 мм;

2 - преграда целиком из интерметаллида Al₃Ti;

3 - преграда целиком из титанового сплава ВТ6;

4 - 17 слоев, толщина слоя Al₃Ti - 0.47 мм, BT6 - 0.70 мм;

5 - 17 слоев, толщина слоя Al₃Ti - 0.23 мм, ВТ6 - 0.94 мм;

6 - 17 слоев, толщина слоя Al₃Ti - 0.70 мм, BT6 - 0.47 мм;

7 - 17 слоев, толщина слоя Al₃Ti - 1.04 мм, BT6 - 0.13 мм.

Кроме того, вместо интерметаллида в композиционном слое был рассмотрен оксид алюминия Al₂O₃ как пример высокопрочной высокоплотной керамики:

8 - преграда целиком из керамики Al₂O₃;

9 - 17 слоев, толщина слоя Al₂O₃ - 0.47 мм, BT6 - 0.70 мм;

10 - 17 слоев, толщина слоя Al₂O₃ - 0.94 мм, BT6 - 0.23 мм;

11 - преграда целиком из менее прочной керамики на основе Al₂O₃;

12 - 17 слоев, слой менее прочной Al₂O₃ - 0.47 мм, BT6 - 0.70 мм.



кривых соответствуют номерам расчетных вариантов.

На рис. 7 и 8 для момента времени 60 мкс представлены полученные в численных расчетах хронограмма процесса внедрения ударника из вольфрамового сплава в семнадцатислойную преграду, поля удельного объема микроповреждений и удельной энергии сдвиговых деформаций во взаимодействующих телах. Результаты расчетов показали, что разрушение слоев композиционной преграды носит слоистый характер (рис. 8) и идет по различным преобладающим механизмам – хрупкому с накоплением V_f (слой интерметаллида) и вязкому с накоплением E_{сдв} (слой металла).

Для исследованных условий взаимодействия эффективными к высокоскоростному удару (отсутствие пробития) проявили себя преграды, содержащие высокопрочную керамику из оксида алюминия, преграда, целиком состоящая из титанового сплава и композиционная преграда с отношением слоев 4:1. При этом преграда из оксида алюминия демонстрирует низкую трещиностойкость, что может приводить к ее полному разрушению после соударения. Преграда из титанового сплава выдерживает удар на пределе пробития. И только металло – интерметаллидный многослойный композит с отношением слоев алюминид титана / титановый сплав ≈ 4 показывает в данных условиях нагружения оптимальный результат – отсутствие пробития, высокая трещиностойкость.

В <u>заключении</u> диссертации сформулированы основные результаты и выводы, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена задача создания физикоматематической модели для исследования механического поведения многослойных металло-интерметаллидных композитов при динамических воздействиях, развита модель разрушения широкодиапазонного типа применительно к плотным хрупким материалам в условиях ударноволнового нагружения. Методом численного моделирования В осесимметричной постановке исследованы процессы динамического взаимодействия ударников с композиционными преградами нескольких типов выявлены особенности деформирования и разрушения металлокерамических, стеклокерамических и многослойных металлоинтерметаллидных преград.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Численно исследован процесс разрушения металлокерамического образца, состоящего из слоя керамики на основе карбида бора и слоя из титанового сплава ВТ4, находящегося на массивной алюминиевой преграде, при ударе по нему стальным высокопрочным ударником с начальной скоростью 760 м/с. Установлено, что слоистый композит данного типа обладает высокими прочностными характеристиками, в процессе нагружения керамический слой образца полностью разрушается, не позволяя при этом ударнику проникнуть в основную преграду позади образца.

2. Численно исследован процесс разрушения стеклокерамического образца, находящегося на массивной алюминиевой преграде, при ударе по нему стальным высокопрочным ударником диаметром $d_0 = 6$ мм с начальной скоростью 760 м/с. Установлено, что в процессе нагружения стеклокерамический образец полностью разрушается. В основной

алюминиевой преграде образуется кратер глубиной 1.2d₀. Показано, что стеклокерамика обладает относительно низкими прочностными характеристиками, а ее использование в элементах защиты может быть обусловлено простотой производства, низкой стоимостью, малым весом.

3. Численно исследованы особенности деформирования и разрушения многослойных металло-интерметаллидных композиционных преград, состоящих из чередующихся слоев интерметаллид Al₃Ti –титановый сплав BT6, при ударе по нему ударником из вольфрамового сплава с начальной скоростью до 1000 м/с. Для описания процесса разрушения интерметаллида применена модель разрушения плотных хрупких материалов. Установлено, что разрушение слоев композиционной преграды идет по различным преобладающим механизмам – хрупкому (слой интерметаллида) и пластичному (слой металла).

4. Проведены численные исследования механического поведения многослойных металло-интерметаллидных композиционных преград, однородных из материалов, составляющих композиционный слой интерметаллидных, металлических, а также прочных и высокопрочных керамических на основе оксида алюминия. Показано, что однородная преграда из интерметаллида Al₃Ti или из титанового сплава BT6 является менее стойкой к ударно-волновому нагружению по сравнению с условий композиционной. Для исследованных взаимодействия эффективными к высокоскоростному удару (отсутствие пробития) проявили себя преграды, содержащие высокопрочную керамику из оксида алюминия, преграда, целиком состоящая из титанового сплава, и композиционная преграда варианта 1 (соотношение толщин слоев ~4:1). При этом преграда из оксида алюминия демонстрирует низкую трещиностойкость, что может приводить к ее полному разрушению после соударения. Преграда из титанового сплава ВТ6 выдерживает удар на пределе пробития.

5. Для исследованных условий нагружения найдено соотношение толщин слоев интерметаллид (алюминид титана Al₃Ti) / металл (титановый сплав BT6), близкое к 4, при котором многослойная композиционная металло-интерметаллидная преграда оказывается наиболее эффективной (отсутствие пробития, наименьшая глубина кратера в композиционной преграде, высокая трещиностойкость) к динамическому воздействию.

Цитируемая литература:

1. Vecchio K.S. Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites // JOM. 2005. P. 25 – 31.

2. Harach D.J. Microstructure evolution in metal-intermetallic laminate (MIL) composites synthesized by reactive foil sintering in air / D.J. Harach, K.S. Vecchio // Metallurgical and Materials Transactions 32A. 2001. P. 1493 - 1505.

 Канель Г.И. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. М.: «Янус-К», 1996. 407 с.
Grady D.E., Moody R.L. Shock compression profile in ceramics // Sandia National Laboratories Report, SAND96-0551, 1996. – 155 p.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Зелепугин С.А. Разрушение металло – интерметаллидного многослойного композита при высокоскоростном ударе / С.А. Зелепугин, С.С. Шпаков // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15. № 3. С. 369 - 382.

2. Зелепугин С.А. Разрушение двуслойной преграды карбид бора – титановый сплав при высокоскоростном ударе / С.А. Зелепугин, С.С. Шпаков // Известия высших учебных заведений. Физика. 2008. Т. 51. № 8/2. С. 166 - 173.

В других научных изданиях:

3. Шпаков С.С. Численное моделирование разрушения металлокерамического образца при высокоскоростном ударе / С.С. Шпаков, С.А. Зелепугин, Т.М. Платова // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (НПО-2005) / Под ред. В.Е. Левина, В.И. Мишина. – Новосибирск: НГТУ. 2005. С. 21 - 22.

4. Зелепугин С.А. Разрушение удлиненного ударника при высокоскоростном взаимодействии с многослойной преградой / С.А. Зелепугин, А.С. Зелепугин, С.С. Шпаков // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике. Тезисы докладов VI Межд. конф., посвященной 105-летию со дня рождения академика М.А. Лаврентьева. – Новосибирск: ИГиЛ СО РАН. 2005. С. 210 - 211.

5. Шпаков С.С. Моделирование разрушения комбинированной преграды карбид бора – сплав титана при ударе / С.С. Шпаков, С.А. Зелепугин // Труды Всероссийской научной конференции в 7-ми частях. «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2005). - Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2006. Часть 1. С. 179 - 180.

6. Зелепугин С.А. Широкодиапазонная модель разрушения керамики при высокоскоростном ударе / С.А. Зелепугин, В.Ф. Толкачев, А.С. Зелепугин, С.С. Шпаков // Тезисы XXI Межд. конф. «Уравнения состояния вещества», Эльбрус-2006. - Черноголовка: ИПХФ РАН. 2006. С. 67 - 68.

7. Зелепугин С.А. Численное и экспериментальное исследование разрушения керамики при высокоскоростном ударе / С.А. Зелепугин, В.Ф. Толкачев, А.С. Зелепугин, С.С. Шпаков // Труды V Всеросс. конференции

«Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики». -Томск: Изд-во Томского госуниверситета, 2006. С. 261 - 262.

8. Зелепугин С.А. Оптимизация прочностных характеристик многослойных пластин / С.А. Зелепугин, А.С. Зелепугин, С.С. Шпаков // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сб. тезисов докладов межд. конф. «IX Харитоновские тематические научные чтения». - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. С. 181.

9. Зелепугин С.А. Особенности разрушения многослойной преграды при высокоскоростном ударе / С.А. Зелепугин, С.С. Шпаков // Физика экстремальных состояний вещества-2008 / Под ред. Фортова В.Е. и др. - Черноголовка: ИПХФ РАН, 2008. С. 127 - 129.

10. Zelepugin S.A. Synthesis of multilayer composites and optimization of their strength properties / S.A. Zelepugin, O.A. Shkoda, N.G. Kasatskii, **S.S. Shpakov** // Shock-Assisted Materials Synthesis and Processing: Science, Innovations, and Industrial Implementation / Edited by A.A. Deribas and Yu.B. Scheck. – M.: Torus Press, 2008. P. 65 - 67.

11. Шпаков С.С. Компьютерное моделирование противоударной стойкости многослойной преграды / С.С. Шпаков, С.А. Зелепугин // Всероссийская конференция по математике и механике. - Изд-во Том. ун-та, 2008. С. 273.

12. Зелепугин С.А. Применение программного комплекса КОМП2 для решения динамических задач МДТТ / С.А. Зелепугин, В.Б. Никуличев, О.В. Иванова, А.С. Зелепугин, С.С. Шпаков, А.Н. Шипачев, Е.В. Ильина, С.М. Ушаков, И.К. Суглобова // Сб. трудов Международной конференции «Ударные волны в конденсированных средах». – Moscow: High Pressure Center, 2008. С. 184 – 188.

13. Шпаков С.С. Взаимодействие высокопрочного ударника с пластинами различных типов / С.С. Шпаков, С.А. Зелепугин, О.А. Шкода, Н.Г. Касацкий // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов V Всероссийской конференции молодых ученых. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. С. 237 - 241.

14. Зелепугин С.А. Разрушение высокопрочных керамик в составе комбинированных преград / С.А. Зелепугин, В.Ф. Толкачев, С.С. Шпаков // Современная баллистика и смежные вопросы механики. Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора М.С. Горохова – основателя Томской школы баллистики. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2009. С. 217 -218.

15. Ильина Е.В. Синтез многослойных композитов и моделирование их разрушения при динамическом нагружении / Е.В. Ильина, С.С. Шпаков, С.А. Зелепугин // Современные проблемы математики и механики: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции Томского государственного университета. -Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. С. 83 - 85. 16. Зелепугин С.А. Разрушение многослойных композитов при ударноволновом нагружении / С.А. Зелепугин, С.С. Шпаков, О.К. Лепакова, Н.Г.

Касацкий // Забабахинские научные чтения: сборник материалов X Межд. конференции 15-19 марта 2010. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2010. С. 265-266.

17. Зелепугин С.А. Разрушение многослойных композитов при динамическом нагружении / С.А. Зелепугин, С.С. Шпаков, О.К. Лепакова, Н.Г. Касацкий, О.А. Шкода // International Conference "Shock Waves in Condensed Matter" / Ed. V.Yu. Klimenko, M.A. Khusainov. – Moscow: High Pressure Center, 2010. С. 333 - 336.

18. Zelepugin S.A. Failure of metallic-intermetallic laminate composites under shock wave loading / S.A. Zelepugin, **S.S. Shpakov**, A.S. Zelepugin, A.N. Shipachev // 8th International Conference "New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter". – Paris: CEA-DAM Ile-de-France, 2010. P. 142.