На правах рукописи

Зелепугин Алексей Сергеевич

РАЗРУШЕНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ПРЕГРАД С ИНЕРТНЫМИ И РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫМИ СЛОЯМИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
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" и в отделе структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Скрипняк Владимир Альбертович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, снс Герасимов Александр Владимирович

доктор физико-математических наук, доцент Смолин Игорь Юрьевич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва

Защита состоится 24 сентября 2010 года в 10 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 19 августа 2010 г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Широкое применение в конечной баллистике удлиненных ударников обуславливает устойчивый интерес к исследованию особенностей их взаимодействия с преградами в условиях высокоскоростного соударения. Несмотря на большое внимание к данной проблеме и имеющиеся в литературе работы в этой области как экспериментального, так и теоретического плана, проблема далека от полного решения. Развитие исследований стимулирует также модификация существующих и создание новых материалов, применение комбинированных конструкций, включающих материалы с существенно различной реологией. Значительное внимание исследователей привлекает проблема наклонного взаимодействия удлиненного ударника с комбинированными преградами конечной толщины. Такие преграды располагаются перед основной, как правило, массивной, преградой и в классическом варианте состоят из трех слоев – лицевого и тыльного стальных слоев и промежуточного рабочего слоя. В качестве рабочего слоя часто используется взрывчатое вещество («динамическая защита»), реакционноспособная смесь (смесь, в которой при динамическом воздействии инициируются твердофазные химические превращения с сильными экзотермическими эффектами) или инертный материал. Последние два случая и, особенно, комбинация всех перечисленных случаев, мало изучены.

Актуальность исследований обусловлена потребностью в прогнозировании деформирования и разрушения комбинированных преград при наличии в ней нескольких слоев из инертных и реагирующих материалов, в качественной и количественной оценке процесса разрушения удлиненного ударника при несимметричном соударении с комбинированными преградами различных типов, в оценке запреградного воздействия группы тел.

Цель работы

Целью диссертационной работы является исследование закономерностей разрушения комбинированных слоистых преград с инертными и реакционноспособными материалами при высокоскоростном ударе деформируемыми ударниками.

Задачи, решаемые для достижения цели

1. Развитие математической модели, описывающей процессы деформации, разрушения, механохимических экзотермических превращений во взаимодействующих многослойных защитных конструкциях и удлиненных ударниках.
2. Численное исследование несимметричного высокоскоростного взаимодействия удлиненного ударника с комбинированными многослойными преградами, содержащими промежуточные инертные слои.

3. Исследование явления снижения проникающей способности удлиненных ударников при высокоскоростном взаимодействии с трехслойной защитной конструкцией, содержащей промежуточный инертный слой из эластомера.
4. Исследование деформации и разрушения многослойных комбинированных преград, содержащих один или два реагирующих слоя, при несимметричном высокоскоростном взаимодействии с удлиненным ударником.
5. Исследование физического механизма роста глубины внедрения при ударе группы малодеформируемых тел по сравнению с одиночным ударом.

Научная новизна работы

1. Численно исследованы параметры несимметричного высокоскоростного взаимодействия удлиненного ударника с трехслойной и семислойной комбинированной преградой, содержащей промежуточные инертные слои из эластомера. Установлена зависимость характера деформирования и разрушения стержня от толщины тыльного слоя трехслойной комбинированной преграды. Установлено, что при проникании ударника в семислойную комбинированную преграду реализуется чередование различных преобладающих механизмов разрушения.
2. Численно исследованы особенности процессов несимметричного высокоскоростного взаимодействия удлиненного ударника с комбинированной преградой, содержащей промежуточные реагирующие слои. Установлено соотношение толщин лицевых и тыльных пластин и реагирующего слоя в комбинированной трехслойной преграде, обеспечивающее снижение проникающей способности ударника. Выявлены отличия в характере разрушения удлиненного ударника при взаимодействии с комбинированной преградой, содержащей промежуточные реагирующие или инертные слои.
3. Численно исследовано внедрение группы малодеформируемых тел в массивную преграду. Выявлен механизм снижения эффективных прочностных характеристик преграды и существенного роста глубины внедрения при ударе группы тел по сравнению с одиночным ударом в диапазоне умеренных скоростей соударения.

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 ударно-волнового нагружения как инертных, так и реакционноспособных сред, 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, Кыргызско-Российском славянском университете (г. Бишкек, Кыргызская Республика).

Связь работы с научными программами и темами

Диссертация выполнялась по программе Министерства образования и науки РФ в рамках АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проекты 2.1.1/5993, 2.1.2/2509), Минобрнауки РФ и CRDF по Российско-американской программе «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант RUX0-016-TO-06), 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, 08-08-12055), РФФИ - Администрация Томской области (проекты 05-03-98001, 09-08-99059).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Физико-математическая модель, описывающая процессы высокоскоростной деформации и динамического разрушения комбинированных преград с инертными и реагирующими слоями при взаимодействии с деформируемыми ударниками при скоростях от 200 до 1800 м/с.
2. Закономерности деформации и разрушения слоистых комбинированных преград с инертными слоями и удлиненных ударников при несимметричном высокоскоростном ударе, свидетельствующие о том, что наличие промежуточного слоя эластомера в многослойной защитной конструкции позволяет интенсифицировать разрушение удлиненного ударника при скоростях взаимодействия от 1000 до 1600 м/с.
3. Явление снижения проникающей способности удлиненного ударника с помощью трехслойной защитной конструкции с промежуточным инертным слоем, обусловленное изменением режима деформирования стержня от преимущественного изгиба и последующего отделения головной части ударника к его срабатыванию (разрушению) при увеличении толщины тыльного слоя до значения, равного диаметру ударника, и более.
4. Результаты численного исследования несимметричного высокоскоростного взаимодействия удлиненного ударника с

комбинированной преградой, содержащей промежуточный реагирующий слой, свидетельствующие о существенном уменьшении проникающей способности ударника при инициализации механохимических процессов в рабочем слое преграды.

5. Результаты численного исследования коллективного взаимодействия группы сферических ударников с преградой, свидетельствующие о существенном увеличении глубины внедрения группы малодеформируемых тел по сравнению с одиночным ударом.

Личный вклад автора

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

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на 21 Всероссийской и Международной конференциях и симпозиумах:

1. Научная сессия МИФИ, III научно-техническая конференция “Научно-инновационное сотрудничество” по межотраслевой программе сотрудничества между Минобразования России и Минатомом России, г. Москва, 2004 г.

2. II Международная конференция по горению и детонации – Мемориал Зельдовича, г. Москва, 2004 г.

3, 4. XIX, XXI Международные конференции «Уравнения состояния вещества», пос. Эльбрус, 2004, 2006 гг.

5, 6. Международные конференции «Shock waves in condensed matter», Санкт-Петербург, 2004, 2008 гг.

7. Международная конференция «Забабахинские научные чтения», г. Снежинск, 2005 г.

8, 9. Международные конференции «VII, IX Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», г. Саров, 2005, 2007 гг.

10. VI Международная конференция «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике», г. Новосибирск, 2005 г.

11, 12. XX, XXII Международные конференции «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество», пос. Эльбрус, 2005, 2007 гг.

13. Международная школа-конференция молодых ученых «Физика и химия наноматериалов», г. Томск, 2005 г.

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

15. Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Научная сессия ТУСУР – 2006, г. Томск, 2006 г.

16. V Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» , г. Томск, 2006 г.
17, 18. II, III Всероссийские конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», г. Томск, 2006, 2007 гг.
19. Международная конференция «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии», г. Томск, 2007 г.
20, 21. International Conference «New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter», Lisbon-Monte Estoril, Portugal, 2008, Paris, France, 2010.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 19 печатных работах, из них 3 – статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, 12 – статьи в сборниках трудов, материалах Всероссийских и Международных конференций, 4 – тезисы докладов.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения. Общий объем работы 154 страницы, включая 92 рисунка, 4 таблицы, 103 библиографических ссылки в списке использованной литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Раздел 1. Математические модели и численные алгоритмы расчета соударения деформируемых твердых тел в пространственной постановке (1.1. Физико-математическая модель процесса деформирования и разрушения преград из инертных материалов при высокоскоростном взаимодействии тел, учитывающая кинетику повреждения материалов и тепловые эффекты; 1.2. Метод численного решения задач высокоскоростного соударения; 1.3. Моделирование высокоскоростного взаимодействия цилиндрического тела с жесткой стенкой в двумерной и трехмерной постановке; 1.4. Расчет несимметричного высокоскоростного взаимодействия удлиненного ударника с семислойной комбинированной преградой в трехмерной постановке).

В первом 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:

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

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

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

$$\frac{d\,V_f}{dt} = \begin{cases} 0, \quad \text{если } |P_c| \le P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f = 0) \\ -\mathrm{sign}\,(P_c)\,K_f\,(|P_c| - P^*)(V_2 + V_f), \\ \quad \text{если } P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f > 0) \end{cases} , \qquad (4)$$

где ρ - плотность, t – время, υ - вектор скорости с компонентами υ_i, $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij}+S_{ij}$ - 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, $P^* = P_kV_1/(V_f+V_1)$; V_1, 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:

$$P_c = \rho_0 a^2\mu + \rho_0 a^2[1-\gamma_0/2+2(b-1)]\,\mu^2 + \\ +\rho_0 a^2[2(1-\gamma_0/2)(b-1)+3(b-1)^2]\,\mu^3 + \gamma_0\rho_0 E \ ,$$

где $\mu = V_0/(V-V_f)-1$, γ_0 - коэффициент Грюнайзена, V_0 и V - начальный и текущий удельные объемы, a 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_{ij}^0/dt - производная по Яуманну, определяемая формулой:

$$\frac{dS_{ij}^0}{dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik}\omega_{jk} - S_{jk}\omega_{ik} ,$$

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:

$$G = G_0\, K_T\left(1 + \frac{cP}{(1+\mu)^{1/3}}\right)\frac{V_3}{(V_f + V_3)} ,$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0\, K_T\left(1 + \dfrac{cP}{(1+\mu)^{1/3}}\right)\left(1 - \dfrac{V_f}{V_4}\right), \text{ если } V_f \le V_4 \\ 0, \text{ если } V_f > V_4 \end{cases} , \quad (5)$$

$$K_T = \begin{cases} 1 , & \text{если } T_0 \le T \le T_1 \\ \dfrac{T_m - T}{T_m - T_1} , & \text{если } T_1 < T < T_m \\ 0 , & \text{если } T \ge T_m \end{cases} .$$

Здесь T_m - температура плавления, c, 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 c^{-1} и выше.

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 c_p возрастает линейно с ростом температуры до температуры плавления вещества:

$$c_p = \begin{cases} c_p^0 + \dfrac{c_p^L - c_p^0}{T_m - T_0}(T - T_0), & \text{если } T_0 \le T < T_m \\ c_p^L, & \text{если } T \ge T_m \end{cases},$$

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 $\xi = 1 - \rho_0 / \rho_c$, 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 E_{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

$$E_{sh}^c = a_{sh} + b_{sh}\upsilon_0,$$

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.

Таблица 1. Сталь.

№	υ_0, м/с	σ, ГПа	$l_к/l_0$		%
			расчет	эксп.	
1	250	0.8	0.796	0.808	1.5
2	250	1.2	0.845	0.837	1.0
3	400	0.8	0.603	0.590	2.2
4	600	0.8	0.342	0.334	2.4

В качестве теста численной методики была рассмотрена в двух- и трехмерной постановках задача динамического взаимодействия цилиндрического тела с жесткой стенкой (задача Тейлора). В таблице 1 приведены полученные численные результаты для стали в сравнении с экспериментальными данными. Наблюдается хорошее их согласие для отношения конечной длины цилиндра к начальной.

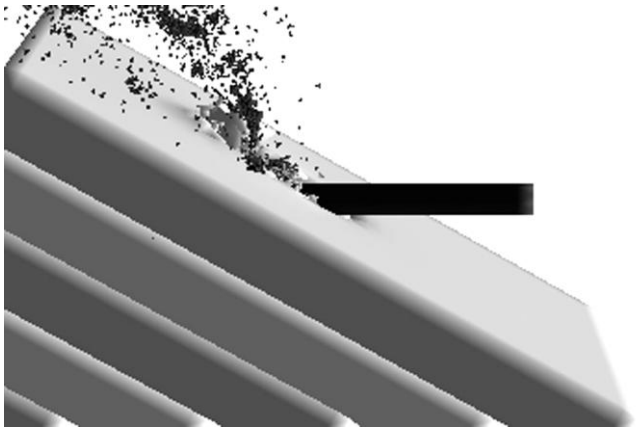

Рис 1. Фрагмент взаимодействующих тел в момент времени 350 мкс.

Численно в трехмерной постановке была решена задача о несимметричном высокоскоростном взаимодействии удлиненного ударника из вольфрамового сплава ВНЖ с семислойной инертной преградой, представляющей собой конструкцию из чередующихся слоев из стали средней твердости и эластомера (вакуумной резины). В расчетах

моделировалось взаимодействие ударника диаметром 24 мм и длиной 654 мм (удлинение 27.25) с семислойной преградой длиной 750 мм и шириной 125 мм. Толщина каждого из слоев преграды составила 50 мм, а общая толщина преграды 350 мм. Начальная скорость удара составила 1500 м/с, угол подхода ударника был 60^0 от нормали к преграде. Исследования показали, что проведение подобных расчетов очень трудоемкий процесс, общее число расчетных узлов и элементов в данном случае превышает миллион, а время одного полного расчета на современном компьютере составляет более месяца. В таких условиях проведение параметрических расчетов не представляется возможным, поэтому основной объем вычислений был проведен в двумерной постановке.

<u>Раздел 2.</u> Исследование несимметричного высокоскоростного взаимодействия удлиненного ударника с комбинированной преградой, содержащей слои инертных материалов. (2.1. Деформирование и разрушение трехслойной преграды с промежуточном слоем эластомера при высокоскоростном взаимодействии с удлиненным ударником; 2.2. Исследование процессов деформации и разрушения удлиненного ударника при высокоскоростном взаимодействии с трехслойной защитной конструкцией, содержащей промежуточный слой эластомера; 2.3. Деформация и разрушение многослойных преград из инертных материалов при высокоскоростном ударе стержня).

В плоской постановке (рис. 2) рассматривается задача взаимодействия ударника, занимающего область D_1, с трехслойной преградой, состоящей из лицевой и тыльной стальных пластин, занимающих область D_2, и рабочего слоя эластомера, занимающего область D_3.

Моделировалось взаимодействие ударника из вольфрамового сплава (ВНЖ) шириной 8.8 мм и длиной 176 мм с трехслойной преградой длиной 250 мм. Первый и третий слои преграды представляли собой идентичные пластины из стали, толщина которых варьировалась, при этом толщина верхней пластины принимала значения 3 и 6 мм, а нижней 3, 6 и 9 мм. Между ними находился инертный слой из эластомера, в качестве которого была выбрана резина. Толщина слоя задавалась равной 18 мм. Начальная скорость удара составила 1600 м/с, угол подхода ударника был 60^0 от нормали к преграде. В таблице 2 приведены параметры расчетных вариантов. На рис. 3 представлены хронограммы процесса взаимодействия тел для варианта 3-18-3 (вариант а).

Можно выделить несколько характерных этапов процесса:

- выход ударной волны на тыльную поверхность преграды, который вызывает образование тыльной выпуклости. Одновременно идет формирование лицевой каверны, сопровождающееся разрушением лицевого слоя преграды и головной части стержня.

- формирование дополнительной тыльной выпуклости, обусловленное волной сжатия, при дальнейшем внедрении стержня в преграду. При этом идет интенсивное деформирование и срабатывание материала взаимодействующих тел.

- образование сквозного отверстия на этапе выхода стержня к тыльному слою преграды, на котором начинается деформирование тыльного слоя непосредственно стержнем. Параллельно наблюдается разрушение тыльного слоя преграды на фрагменты в плоскости удара.

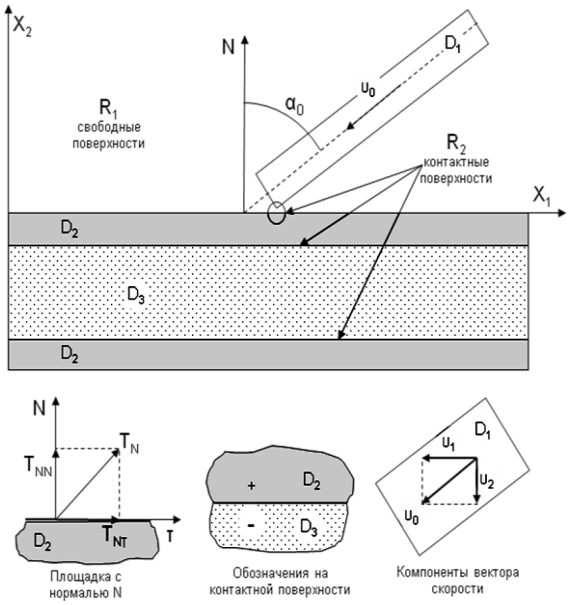

Рис. 2. Постановка задачи.

Таблица 2. Параметры расчетных вариантов.

Параметр/Вариант	а	б	в	г	д	е
Толщина лицевого стального слоя	3 мм ($0.34d_0$)			6 мм $0.68d_0$	3 мм ($0.34d_0$)	
Толщина промежуточного слоя	18 мм ($2.05d_0$)					
Материал промежуточного слоя	эластомер				воздух	сталь
Толщина тыльного стального слоя	3 мм $0.34d_0$	6 мм $0.68d_0$	9 мм $1.02d_0$	3 мм ($0.34d_0$)		

Расчеты показывают, что стержень вступает в непосредственное взаимодействие с малоподвижным (особенно в горизонтальном

направлении) участком тыльного слоя преграды. В последующие моменты процесса наблюдается прогрессирующий изгиб стержня, особенно ярко выраженный в головной части.

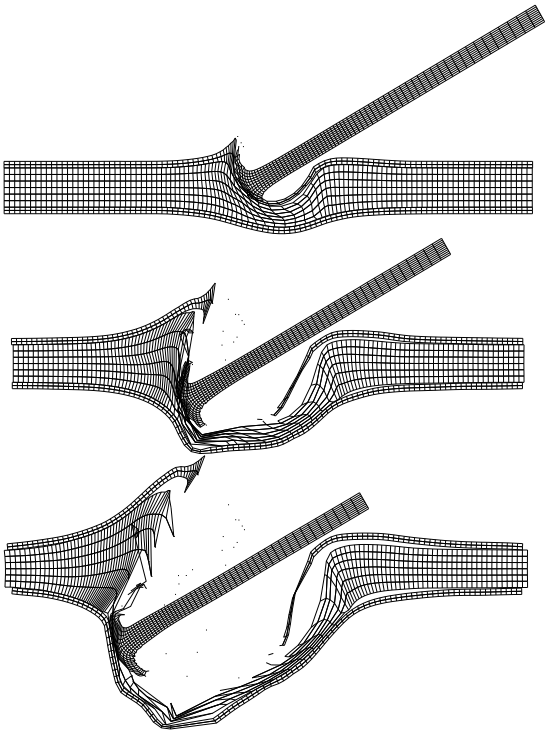

Рис. 3. Хронограммы процесса взаимодействия тел для варианта 3-18-3 в моменты времени 30, 60 и 90 мкс.

Увеличение толщины тыльного слоя преграды до 6 или 9 мм приводит к прекращению формирования дополнительной тыльной выпуклости из-за увеличения инерции слоя. Процесс непосредственного взаимодействия стержня с тыльным слоем по мере роста толщины данного слоя становится все более продолжительным этапом всего процесса соударения. При этом качественно меняется характер разрушения головной части стержня. Изменение заключается в переходе от преобладающего изгиба головной части стержня и возможному последующему ее отделению в запреградном пространстве к срабатыванию (разрушению эрозионного типа) головной части стержня.

Увеличение толщины лицевого слоя с 3 до 6 мм приводит к некоторому росту рикошетирующего эффекта, большему срабатыванию стержня на начальном этапе процесса, однако не вызывает качественных изменений в

поведении стержня в запреградном пространстве после пробития трехслойной инертной конструкции.

Сравнение экспериментальных данных с полученными в работе численными результатами показывает их качественное согласие в описании характера разрушения головной части удлиненного ударника при взаимодействии с комбинированной инертной преградой.

Исследован процесс высокоскоростного взаимодействия удлиненного ударника с семислойной преградой, представляющей собой конструкцию из чередующихся слоев из стали средней твердости и резины. На рис. 4 представлена хронограмма процесса взаимодействия с параметрами: ударник ширина 24 мм, длина 654 мм (удлинение 27.25), 1500 м/с, угол подхода 60^0; преградой длиной 750 мм, толщина каждого из 7 слоев 50 мм.

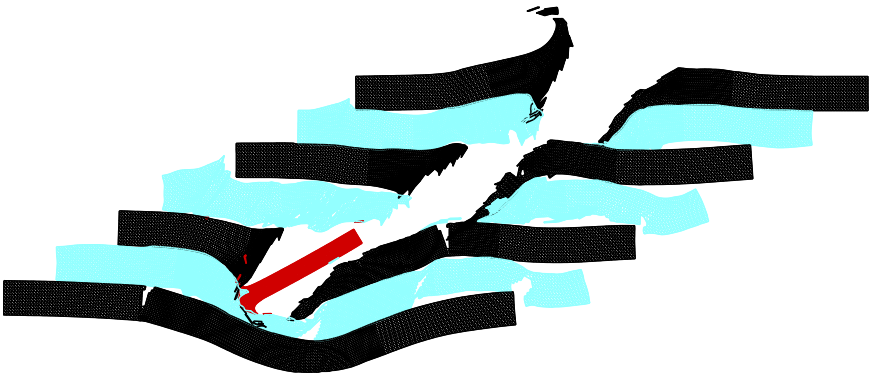

Рис. 4. Хронограмма процесса взаимодействия ударника с семислойной инертной комбинированной преграды в момент времени 800 мкс.

Установлено чередование преобладающего механизма разрушения материала ударника: основной этап разрушения эрозионного типа имеет место при взаимодействии ударника со стальными слоями, при взаимодействии с резиновыми слоями ударник проходит этап разгрузки, что приводит к росту микроповреждений в ударнике и последующему разрушению по типу «на разрыв».

<u>Раздел 3.</u> Исследование процессов деформирования и разрушения комбинированных преград, содержащих промежуточные реакционноспособные слои, при высокоскоростном взаимодействии с удлиненным ударником. (3.1. Анализ распространения ударных волн в двуслойной преграде при ударе под углом и по нормали; 3.2. Моделирование механоактивируемых химических превращений в системе Al-S в условиях ударно-волнового нагружения; 3.3. Высокоскоростное взаимодействие удлиненного ударника с трехслойной преградой с

промежуточным химически активным слоем; 3.4. Численное исследование несимметричного высокоскоростного взаимодействия удлиненного ударника с комбинированной преградой, включающей два промежуточных активных слоя).

Большой научный и практический интерес представляет использование слоев твердофазно реагирующих материалов для повышения эффективности защитных свойств комбинированных преград. В данном разделе работы представлены результаты численных исследований механохимических процессов в смеси алюминия и серы в условиях, реализующихся при высокоскоростном ударе. Порошковая смесь рассматривалась как сплошная среда, термомеханические свойства которой на каждом расчетном шаге по времени усреднялись в зависимости от массовых долей компонентов. Тепловыделение в результате химических превращений включалось в уравнение энергии. Влияние дисперсности компонентов смеси на скорость протекания реакции синтеза сульфида алюминия (Al_2S_3) учитывалось варьированием констант, входящих в кинетическую модель.

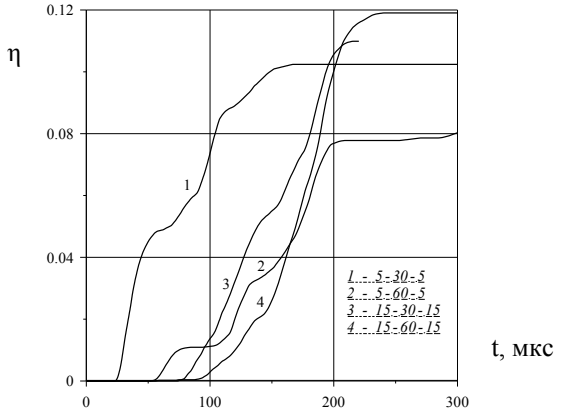

Рис. 5. Степень превращения в результате химической реакции (среднее значение по всему слою активного материала).

В расчетах моделировалось взаимодействие ударника из вольфрамового сплава шириной 24 мм и длиной 660 мм с трехслойной преградой длиной 500 мм. Первый и третий слои преграды представляли собой идентичные пластины из стали высокой твердости толщиной 5 или 15 мм. Между ними находился слой активного материала из смеси алюминия, серы и инертного материала. Толщина слоя задавалась 30 или 60 мм. Начальная пористость смеси составила 20%. Начальная скорость удара была равна 1750 м/с, угол подхода 60^0. На рис. 5 приведены графики степени превращения вещества в активном слое комбинированной преграды для вариантов 1-4,

обозначенных на рисунке. Результаты показывают сильное влияние геометрических размеров сборки на протекание химических реакций в смеси. Сравнение кривых 1 и 2, относящихся к случаю 5-мм крышек, но вдвое отличающихся толщиной активного слоя – 30 и 60 мм – показывает заметное влияние удаленности тыльной стальной пластины, вызывающее более позднее начало химической реакции во втором случае. Более того, во втором случае реакция на некоторое время практически останавливается, возобновляясь вновь при более глубоком внедрении ударника. Более толстые пластины (кривые 3 и 4) уменьшают время запаздывания химической реакции для большего по толщине слоя.

Применение более толстых лицевых крышек ведет к более позднему началу химической реакции. Одновременно возрастает эффективность активного слоя. Сравнение кривых 1 и 3, 2 и 4 показывает, что для более тонкого активного слоя увеличение втрое толщины лицевых и тыльных крышек сказалось незначительно, в то время как для 60-мм слоя привело к резкому росту доли прореагировавшего материала.

Исследованы процессы высокоскоростного взаимодействия удлиненных ударников с пятислойными комбинированными преградами, содержащими промежуточный слой взрывчатого вещества и слой твердофазно реагирующей смеси. Моделировалось взаимодействие ударника из вольфрамового сплава шириной 8.8 мм и длиной 176 мм с пятислойной преградой общей толщиной 48 мм. Первый, третий и пятый слои представляли собой пластины из стали. Второй слой представлял собой взрывчатое вещество, четвертый - химически активную смесь Al-S. Начальная скорость удара составила 1600 м/с, угол подхода ударника 60^0.

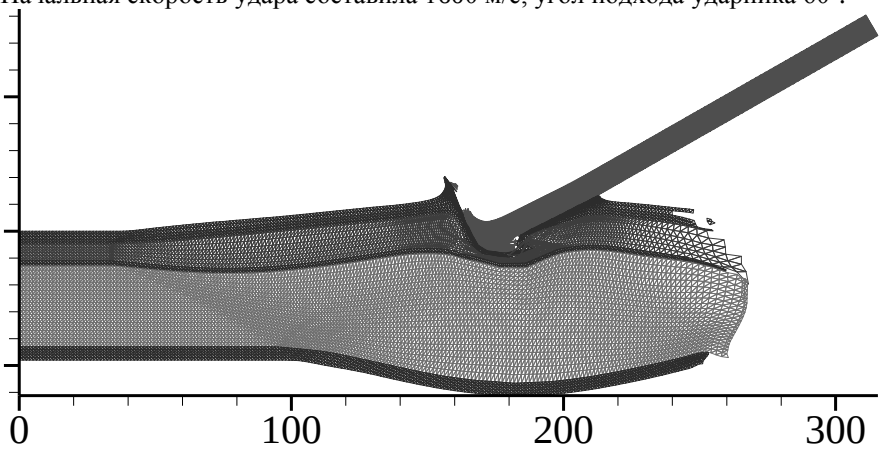

Рис. 6. Хронограмма процесса в момент времени 19 мкс.

Наиболее важным моментом процесса является контактирование верхнего стального слоя преграды с боковой поверхностью стержня, что не

наблюдается в случае инертных слоев материала. По мере разлета продуктов детонации процесс контактирования верхнего слоя с ударником приобретает все большее значение. Установлено, что при наличии активного слоя в составе комбинированной преграды разрушение удлиненного ударника происходит путем разделения его на части, в отличие от преимущественного изгиба и срабатывания при взаимодействии с инертной преградой. Полученные численные результаты качественно соответствуют экспериментальным данным.

Раздел 4. Динамика внедрения группы компактных тел в преграду. (4.1. Экспериментальное обнаружение роста глубины внедрения при ударе группы тел с умеренными скоростями; 4.2. Численное моделирование внедрения ударника в преграду с кратером. Физический механизм существенного роста глубины внедрения при ударе группы малодеформируемых тел по сравнению с одиночным ударом).

После пробития удлиненным ударником комбинированной преграды, образуется облако осколков различного спектра, движущееся в запреградном пространстве с умеренными скоростями, при которых эффекты ударного сжатия и разогрева среды сравнительно слабы и ведущую роль играют деформационные процессы, определяемые прочностными характеристиками материала. Представляет важный научный и прикладной интерес прогнозирование взаимодействия такого потока с элементами конструкций, расположенными за защитной комбинированной преградой.

В РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров) экспериментально исследовалось внедрение группы шариков из стали ШХ-15 диаметром d = 5 мм в преграды из дюралюминия марки Д16-Т с относительными толщинами h = 3d и 20d в диапазоне умеренных скоростей ударников 1200 - 1400 м/с и было показано, что в опыте зафиксировано проникание четырех близкорасположенных шариков на глубину z = 3.6d (глубина внедрения z = 18 мм). Это значение существенно выше глубины проникания в случае одиночного удара, составляющей при подобных условиях z = 2.2d. Были зафиксированы сквозные пробивания пластины толщиной 15 мм при ударе группы шариков, тогда как при одиночном ударе пробитие пластины не происходило.

Несмотря на заметное количество экспериментальных данных, причины, приводящие к заметному росту глубины внедрения при ударе группы тел, до сих пор не выяснены.

С целью выявить механизмы локализованного разупрочнения материала при высокоскоростном ударе группы частиц проведены численные расчеты методом конечных элементов в осесимметричной постановке. Особое внимание уделялось исследованию распространения дивергентных волн в преграде, их влиянию на характер взаимодействия.

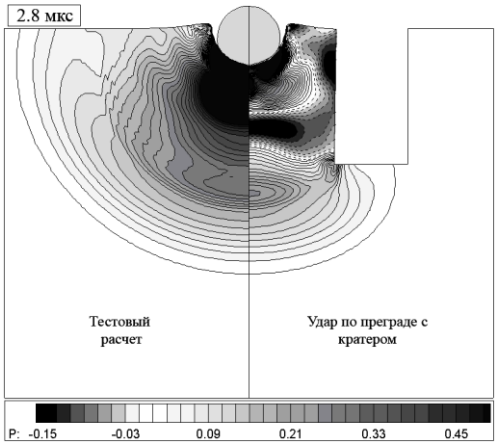

Рис. 7. Распространение ударных волн в преграде с кратером и в сплошной преграде (момент времени 2.8 мкс).

Результаты расчетов указывают на изменение характера распространения дивергентных волн в преграде с кратером, в отличие от распространения волн в преграде без него. В момент времени 2 мкс происходит образование и распространение волны разрежения в результате отражения ударной волны от боковой стенки кратера. В момент времени 2.8 мкс происходит выход этой волны на ось симметрии, что приводит к разделению волны сжатия на две – непосредственно перед ударником и продолжающую распространяться по преграде ударную волну. В случае удара одиночного тела подобные эффекты не возникают (рис. 7). В дальнейшем область сжатия перед внедряющимся ударником смещает область разрежения в направлении тыльной поверхности преграды вдоль оси симметрии и подавляет ее. При этом волна сжатия выходит к боковой стенке кратера и отражается от нее, распространяясь к оси симметрии. В момент времени 7.2 мкс происходит выход вторичной волны разрежения к оси симметрии. Выход волн разрежения к оси симметрии и их распространение вглубь преграды происходит неоднократно.

Результаты расчетов позволяют предложить следующее объяснение существенного роста глубины внедрения при ударе группы тел по сравнению с одиночным ударом. Лидирующая частица проникает в преграду на стандартную величину $z = 2.2d$. Следующие за ней частицы внедряются в преграду с кратером и, как следствие, проникают в преграду, ослабленную неоднократными волнами разрежения. Разрушение материала перед ударником, происходящее при взаимодействии волн разрежения, обеспечивает рост глубины внедрения, наблюдаемый в экспериментах.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты и выводы, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена задача создания математической модели для анализа деформации и разрушения комбинированных преград, содержащих промежуточные слои из инертных эластомеров или реагирующих смесей. Методом численного моделирования исследованы процессы высокоскоростного взаимодействия удлиненных ударников с комбинированными многослойными преградами, выявлены особенности деформирования и разрушения удлиненных ударников при вариации толщин лицевого и тыльного слоев преграды, а также материала промежуточного слоя, изучена динамика процесса внедрения, срабатывания, изгиба и последующего разрушения ударника.

В результате проведенных исследований:

1. Показано, что наличие промежуточного инертного слоя из эластомера в многослойной защитной конструкции позволяет интенсифицировать разрушение удлиненного ударника при скоростях взаимодействия от 1000 до 1600 м/с.

2. Установлено, что закономерности разрушения головной части удлиненного ударника зависят от соотношения толщины тыльного слоя и диаметра ударника. Выявлено, что при увеличении данного отношения происходит изменение характера деформирования стержня от преимущественного изгиба и последующего отделения головной части ударника к его срабатыванию (разрушению).

3. Установлено чередование преобладающего механизма разрушения материала удлиненного ударника при взаимодействии с многослойными инертными преградами. При взаимодействии ударника со стальными слоями имеет место разрушение эрозионного типа. При взаимодействии со слоями эластомера ударник проходит этап разгрузки, что приводит к росту микроповреждений в ударнике и последующему разрушению.

4. Установлено соотношение толщин лицевых и тыльных пластин и реагирующего слоя в комбинированной трехслойной преграде, обеспечивающее снижение проникающей способности ударника. Для сохранения уровня эффективности преграды при увеличении толщины реагирующего слоя необходимо также увеличить толщины лицевой и тыльной пластин.

5. Установлено, что при наличии реагирующего слоя в составе комбинированной преграды разрушение удлиненного ударника происходит путем разделения его на части, в отличие от преимущественного изгиба и срабатывания при взаимодействии с инертной преградой.

6. Предложены приближенные формулы для определения характерных размеров и начальных скоростей ударников при ударе под углом и по нормали для достижения подобия полей напряжений и деформаций в слоистой преграде.

7. Выявлен механизм снижения эффективных прочностных характеристик преграды из алюминиевого сплава Д16-Т при коллективном воздействии группы стальных сферических ударников в диапазоне начальных скоростей 1300 - 1400 м/с, связанный со взаимодействием волн разрежения в преграде.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. Зелепугин А.С. Моделирование химических превращений в системе титан – кремний при ударно-волновом нагружении / С.А. Зелепугин, В.Б. Никуличев, О.В. Иванова, А.С. Зелепугин // **Химическая физика**. 2005. Т. 24, № 10. С. 76-82.
2. Зелепугин А.С. Моделирование разрушения преград при высокоскоростном ударе группы тел / Зелепугин С.А., Зелепугин А.С. // **Химическая физика**. 2008. Т. 27, № 3. С. 71-76.
3. Зелепугин А.С. Механизм роста глубины внедрения при ударе группы малодеформируемых сферических частиц / А.С. Зелепугин, С.А. Зелепугин, В.А. Скрипняк // **Известия вузов. Физика**. 2009. Т.52, №10. С. 38-41.

В других научных изданиях:

4. Зелепугин А.С. Моделирование и оптимизация процессов ударно-волнового компактирования в цилиндрической ампуле / С.А. Зелепугин, А.С. Зелепугин, В.А. Скрипняк // Научная сессия МИФИ-2004. III Научно-техническая конференция “Научно-инновационное сотрудничество” по межотраслевой программе сотрудничества между Минобразования России и Минатомом России. Сб. научных трудов. В 2 частях. Ч. 2. - МИФИ, 2004, с. 150-151.
5. Зелепугин А.С. Разрушение преград при высокоскоростном взаимодействии с группой тел / С.А. Зелепугин, О.В. Иванова, В.Н. Сидоров, А.С. Зелепугин // Физика экстремальных состояний вещества-2004 / Под ред. Фортова В.Е. и др. - Черноголовка: ИПХФ РАН, 2004, с. 112-114.
6. Zelepugin A.S. High-velocity impact of a long rod projectile on a target with a middle elastomer layer / S.A. Zelepugin, O.V. Ivanova, A.S. Zelepugin, S.S. Shpakov // Progress in Combustion and Detonation / Edited by A.A. Borisov, S.M. Frolov, A.L. Kuhl. – Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2004, p. 390-391.
7. Зелепугин А.С. Численное моделирование несимметричного взаимодействия ударника с трехслойной преградой // Физика и химия наноматериалов: Сборник материалов международной школы-конференции молодых ученых (13-16 декабря 2005 г., г. Томск). – Томск: Томский госуниверситет, 2005, с 346-347.

8. Зелепугин А.С. Математическое моделирование процессов внедрения и разрушения при взаимодействии ударника с многослойной преградой // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов II Всероссийской конференции молодых ученых (4-6 мая 2006 г., г. Томск). – Томск: Томский госуниверситет, 2006, с 209-211.
9. Зелепугин А.С. Численное моделирование разрушения ударника при несимметричном внедрении в трехслойную преграду / А.С. Зелепугин, В.А. Скрипняк // Научная сессия ТУСУР – 2006: Материалы докладов Всероссийской научно технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск 4-7 мая 2006 г. – Томск: Издательство «В-Спектр», 2006, ч. 5, с 105-106.
10. Зелепугин А.С. Распространение волн в преграде в результате высокоскоростного удара группы тел / С.А. Зелепугин, А.С. Зелепугин // Физика экстремальных состояний вещества-2007 / Под ред. Фортова В.Е. и др. - Черноголовка: ИПХФ РАН, 2007, с. 141-143.
11. Зелепугин А.С. Влияние волн разгрузки на процесс внедрения группы тел в преграду // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов III Всероссийской конференции молодых ученых (24-27 апреля 2007 г., г. Томск). – Томск: Томский госуниверситет, 2007, с 160-162.
12. Зелепугин А.С. Применение программного комплекса КОМП2 для решения динамических задач МДТТ / С.А. Зелепугин, В.Б. Никуличев, О.В. Иванова и др. // Сб. трудов Международной конференции «Ударные волны в конденсированных средах» (SWCM-2008), 23 – 26 ноября 2008 г., Санкт-Петербург. – Moscow: High Pressure Center, p. 184 – 188.
13. Зелепугин А.С. Особенности проникания и разрушения удлиненного ударника при высокоскоростном пробитии многослойной преграды частиц / А.С. Зелепугин, С.А. Зелепугин, В.А. Скрипняк // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (НПО-2005), Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, 20-22 апреля 2005 г. / Под ред. В.Е. Левина, В.И. Мишина. – Новосибирск: НГТУ, 2005, с. 45.
14. Zelepugin A.S. Numerical simulation of chemical reactions in a titanium-silicon system under shock wave loading / S.A. Zelepugin, V.B. Nikulichev, O.V. Ivanova, A.S. Zelepugin // Int. conference «Shock waves in condensed matter» 18-23 July, 2004, St. Petersburg, Russia. - St. Petersburg, 2004, p. 149-150.
15. Зелепугин А.С. Динамика внедрения группы малодеформируемых частиц в преграду / А.С. Зелепугин, С.А. Зелепугин, В.А. Скрипняк // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: Материалы Международной конференции. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007, с. 84-85.
16. Зелепугин А.С. Влияние ударно-волновых процессов на разрушение пластин при ударе группы и одиночного тела / С.А. Зелепугин, О.В. Иванова, А.С. Зелепугин, С.С. Шпаков // Межд. конф. VII Харитоновские

тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», 14 – 18 марта 2005, Саров, Россия. Сб. тезисов докладов. - Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, с. 231-232.
17. Зелепугин А.С. Разрушение пластин при высокоскоростном ударе группы тел / С.А. Зелепугин, В.Н. Сидоров, А.С. Зелепугин, С.С. Шпаков // Тезисы XX Межд. конф. «Воздействие интенсивных потоков энергии на вещество», Эльбрус-2005. - Черноголовка: ИПХФ РАН, 2005, с. 85-86.
18. Зелепугин А.С. 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. 27 – 31 мая 2005 г., Новосибирск. – Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2005, с. 210 - 211.
19. Zelepugin A.S. Advanced failure model for simulation of penetration of a group of steel particles into an aluminium alloy target / S.A. Zelepugin, A.S. Zelepugin // International Conference “New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter”, Monte Estoril – Lisbon, Portugal, 18-23 May 2008, p. 70.