На правах рукописи

Зелепугин Сергей Алексеевич

РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С УДАРНИКОМ И ГРУППОЙ ТЕЛ

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск - 2003

Работа выполнена в очной докторантуре Томского государственного университета на кафедре теории прочности и проектирования и в отделе структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН

Научный консультант:

д. ф.-м. н., профессор Платова Татьяна Миновна (Томский государственный университет, г. Томск)

Официальные оппоненты:

д. ф.-м. н., профессор, член-корр. РАН Аннин Борис Дмитриевич (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск)

д. т. н., профессор Люкшин Борис Александрович (Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск)

д. ф.-м. н., профессор Скрипняк Владимир Альбертович (Томский государственный университет, г. Томск)

Ведущая организация:

Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, г. Москва

Защита состоится «2» декабря 2003 года в «14-45» на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Томском государственном университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «____» _____ 2003 г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Широкомасштабные исследования процессов высокоскоростного взаимодействия деформируемых твердых тел экспериментального, аналитического, численного характера в подавляющем большинстве ограничены изучением соударения одиночных тел с преградами различных типов. Как в экспериментальном, так и в теоретическом плане проблемам удара группы тел по преграде и изучению особенностей их коллективного воздействия до сих пор уделялось крайне мало внимания. Такое положение объективно объясняется сложностью процесса множественного удара для моделирования и изучения. В экспериментах трудно реализовать управляемое метание группы тел с требуемым распределением скоростей тел по величине и направлению, расстояний между ними по фронту и глубине группы, обеспечить регистрацию параметров тел при подлете к преграде и в ходе взаимодействия с ней. Для адекватного численного моделирования требуется проведение расчетов в трехмерной постановке, что сдерживается сложностью численных моделей, методик и недостаточной для данного случая производительностью вычислительной техники. Вместе с тем коллективное воздействие на преграду группы частиц различного размера и формы на практике реализуется в большинстве процессов высокоскоростного соударения. Это может быть вторичный удар группы (потока) осколков, образовавшихся в запреградном пространстве после первичного удара. Коллективный характер может носить и первичный удар.

Ряд исследований, проведенных в последние годы, продемонстрировал существенное влияние коллективного действия группы частиц на конечный результат соударения. Было показано[1], что для скорости удара, меньшей величины, необходимой для пробития преграды одиночным телом, при ударе группы тел пробитие преграды возможно за счет интерференции волн разгрузки[2]. При разделении исходного стержня на идентичные сегменты (до 8 сегментов) было установлено[3], что если разнесение сегментов обеспечивает интерференцию волн и взаимовлияние, то уровень разрушений в преграде существенно возрастает. Коллективное действие группы частиц может инициировать детонацию взрывчатых веществ в условиях, когда одиночная час-

---

[1] О механизме коллективного воздействия потока твердых частиц на преграду / Э.Э. Лин, В.Ю. Мельцас, А.Л. Стадник, Ю.В. Янилкин // Письма в ЖТФ. - 2002. - Т. 28, вып. 17. - С. 90 - 94.

[2] Буравова С.Н. Эффект фокусировки волн разгрузки и повреждаемость преграды под действием потока частиц // Письма в ЖТФ. - 1989. – Т. 15, вып. 17. - С. 63-67.

[3] Littlefield D.L., Garcia R.M., Bless S.J. The effect of offset on the performance of segmented penetrators // Int. J. Impact Engng. - 1999. - V. 23, no. 1-10. - P. 547 - 560.

тица детонацию не вызывает[4,5]. Продемонстрировано формирование в пластине областей лицевых и тыльных откольных повреждений эллиптической формы при ударе группы частиц, что обусловлено их взаимным влиянием [26]. Приведенные примеры показывают существенное влияние коллективного фактора при ударе группы тел и вместе с тем демонстрируют, что подобные процессы и явления мало изучены. Таким образом, актуальность исследований поведения материалов при воздействии группы высокоскоростных тел обусловлена потребностью в знаниях о деформировании и разрушении материалов в подобных условиях, о неисследованных ранее эффектах и явлениях при ударно-волновом нагружении группой тел.

Цель работы - исследование деформирования и разрушения элементов конструкций при высокоскоростном взаимодействии с ними ударника и группы тел методами численного моделирования; создание численных методик для исследования и прогнозирования разрушения преград с учетом взаимного влияния группы тел при ударе.

Научная новизна работы.

1. Предложена модель разрушения эрозионного типа, имитирующая на макроуровне разрушение межзеренных структур контактных слоев материала взаимодействующих тел при высокоскоростном ударе. Обоснован выбор критерия разрушения, предложена зависимость данного критерия от условий взаимодействия.

2. Создана численная методика исследования процессов деформирования и разрушения элементов конструкций при высокоскоростном взаимодействии с ними одиночного ударника и потока (группы) тел, включающая предложенную имитационную модель разрушения.

3. Численно в пространственной постановке исследованы процессы синхронного и разновременного соударения группы частиц с пластиной при варьировании начального расстояния между частицами, углов подхода, направления движения, временных интервалов; оценена степень коллективного влияния частиц на характер разрушения преграды в зависимости от начальных параметров удара группы тел.

4. Показано влияние формы носовой части ударника (конической и плоскоторцевой) и его прочностных характеристик на возможность формирования в пластине областей откольных повреждений.

---

[4]Vavrick D.J. Analysis for the critical velocity for detonation from multi-fragment impacts on bare and composite plate covered H-6 explosive // Хим. физика. - 2001. - Т. 20, № 10. - С. 14 - 20

[5]Vasil'ev A.A. Detonation hazards of gaseous mixtures // Prevention of Hazardous Fires and Explosions / V.E. Zarko et al. (eds.). – Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 1999. – P. 93 – 108.

5. Выявлены распределения тепловых и механических параметров, реализующиеся в процессе соударения стального ударника с полимерной пластиной, изучены механизмы ее пробивания и разрушения.

6. Предложена методика численного расчета процессов ортогонального резания металлов инструментом из сверхтвердого материала в диапазоне высоких и сверхвысоких скоростей резания, включающая кинетическую модель разрушения активного типа. Определено, что в качестве критерия отделения стружки при моделировании высокоскоростного резания металлов предпочтительно использовать предельное значение удельного объема микроповреждений.

7. Предложена методика описания поведения высокопрочных керамических материалов в диапазоне скоростей нагружения 100 – 4000 м/с. Исследована динамика образования устойчивых вихревых структур в керамических пластинах на стадии предразрушения при ударе. Установлено, что основной причиной вихреобразования является волновой фактор.

8. Установлено, что при последовательном нагружении керамической пластины группой из двух ударников с относительно низкой скоростью в условиях, когда после первого удара керамическая преграда сохраняет целостность, повторное нагружение при тех же условиях приводит к ее разрушению аналогично удару со значительно более высокой скоростью.

9. В трехмерной постановке проведен анализ и выявлены особенности деформирования и разрушения ударника при взаимодействии с недеформируемой и деформируемой преградой при варьировании скорости удара, угла подхода, при наличии полости в ударнике с наполнителем и без него.

Практическая значимость работы. Получены новые представления о физике и механике процессов взаимодействия группы тел с преградами, об особенностях деформирования и разрушения преград при этом и взаимном влиянии тел. На основе созданных численных методик можно исследовать и прогнозировать поведение материалов при высокоскоростном воздействии потока (группы) тел. Результаты и методики внедрены и используются в ОАО НИИ стали (г. Москва), Кыргызско-Российском славянском университете (г. Бишкек, Кыргызская Республика). Работа получила поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (1994-1995 гг., проект 94-03-08006; 1996-1998 гг., проект 96-03-33659; 1997-1999 гг., проект 97-01-00218; 2000-2002 гг., проекты 00-01-00550 и 00-01-00766; 2002 г., проект 02-01-10573; 2003 г., проекты 03-01-00122 и 03-01-10653), Правительства США (1996-1998 гг., грант DAAL01-96-P-2255), Министерства образования РФ (2001-2002 гг., проект E00-4.0-2), Президиума РАН (2003 г., проект 18.6 в рамках комплексной Программы фундаментальных исследований по на-

правлению «Теплофизика и механика интенсивных энергетических воздействий»).

Достоверность полученных результатов обеспечивается физической и математической корректностью постановок задач, апробированностью выбранного метода их решения, контролем в процессе численного счета выполнения законов сохранения, многократным сравнением с экспериментальными и теоретическими результатами, полученными другими авторами.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Имитационная модель разрушения эрозионного типа для численного описания поведения контактных слоев материала взаимодействующих тел при высокоскоростном ударе.
2. Численная методика исследования процессов деформирования и разрушения элементов конструкций при высокоскоростном взаимодействии с ними ударника и группы тел.
3. Комплекс результатов исследований деформирования и разрушения преград конечной толщины при высокоскоростном ударе по ним группы тел.
4. Группа результатов, полученных с использованием имитационной модели разрушения (влияние формы и прочностных характеристик ударника на разрушение преграды, пробитие полимерной пластины, высокоскоростное резание металлов).
5. Методика описания поведения высокопрочных керамических материалов и полученные результаты, в том числе по нагружению керамической преграды группой тел.
6. Результаты численного исследования взаимодействия одиночного ударника с преградами различных типов при вариации скорости удара, угла подхода, профиля ударника.

Публикации.

Результаты диссертации представлены в 40 работах, из них 24 - в журналах, 16 – в научных сборниках, материалах Всероссийских и Международных конференций.

Апробация работы.

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на III, IV Всес. совещаниях по детонации (Таллинн, 1985, Телави, 1988), X - XV Научных чтениях по космонавтике (Москва, 1986 - 1991), Всес. конференциях «Современные проблемы физики и ее приложений» (Москва, 1987, 1990), X Всес. конференции по численным методам решения задач теории упругости и пластичности (Красноярск, 1987), II координаци-

онном совещании «Вопросы физики и газодинамики ударных волн» (Одесса, 1987), Республиканском семинаре «Прочность и формоизменение элементов конструкций при воздействии физико-механических полей» (Киев, 1990), I Всес. совещании "Диэлектрические материалы в экстремальных условиях" (Суздаль, 1990), расширенном заседании Научного совета АН «Электрофизические свойства диэлектриков при воздействии электромагнитных и акустических полей» (Иваново, 1991), Межд. школе-семинаре «Физика и газодинамика ударных волн» (Минск, 1992), IX конференции «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики» (пос. Красновидово Московской обл., 1992), II - VI Межд. научных конференциях CADAMT (Томск, 1992, 1993, 1995, 2001, Байкальск, 1997), II Всерос. семинаре по динамике пространственных и неравновесных течений жидкости и газа (Миасс Челябинской обл., 1993), XII, XIII Межд. школах MODCOM. Модели механики сплошной среды (Казань, 1993, Санкт-Петербург, 1995), IV, V Межд. конференциях «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (Казань, 1995, Новосибирск, 2000), Int. Conference MESOFRACTURE'96. Mathematical methods in physics, mechanics and mesomechanics of fracture (Томск, 1996), Межд. конференциях «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (Томск, 1996, 1998, 2000, 2002), Межд. конференции «Всесибирские чтения по математике и механике» (Томск, 1997), I - III Всерос. научных конференциях «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 1998, 2000, 2002), Int. Conferences SWCM. Shock Waves in Condensed Matter (Санкт-Петербург, 1998, 2000, 2002), III Сибирской школе-семинаре "Математические модели механики сплошных сред" (Новосибирск, 1999), VI - VIII Всерос. научно-технических конференциях "Механика летательных аппаратов и современные материалы" (Томск, 1999, 2000, 2002), IV Сибирском конгрессе по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ-2000, Новосибирск), XII Симпозиуму по горению и взрыву (Черноголовка, 2000), Межд. конференции III Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (Саров, 2001), Int. Workshop "Mesomechanics: Foundations and Applications" (Томск, 2001), Межд. научной конференции "Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика", посвященной 80-летию акад. Н.Н. Яненко (Новосибирск, 2001), VIII Всерос. съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001), Межд. конференциях VI, VII Забабахинские научные чтения (Снежинск, 2001, 2003), Всерос. конференции "Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов" (Москва, 2002), Int. Workshop "New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in

Condensed Matter" (Edinburgh, Scotland, 2002), Межд. конференции V Харитоновские тематические научные чтения «Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях» (Саров, 2003), а также на семинарах кафедры теории прочности и проектирования Томского государственного университета, НИИ прикладной математики и механики при ТГУ, отдела структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН, института гидродинамики СО РАН, института теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем диссертации 236 страниц, включая 142 рисунка, 214 наименований в библиографическом списке и 4 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Раздел 1. Система основных уравнений и соотношения метода конечных элементов для численного решения проблем высокоскоростного удара. Задача Тейлора (1.1. Система уравнений для описания нестационарных адиабатических движений упругопластической среды с учетом разрушения и тепловых эффектов; 1.2. Конечно-разностные соотношения метода конечных элементов для численного решения пространственных задач высокоскоростного соударения деформируемых твердых тел; 1.3. Трехмерный расчет взаимодействия цилиндрических тел с жесткой стенкой). 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). Общий объем среды W составляют неповрежденная часть, занимающая объем W_c и характеризующаяся плотностью ρ_c, и микрополости (пустоты), занимающие 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:

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

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

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

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

где ρ - плотность, t – время, υ - вектор скорости с компонентами υ_i, $\sigma_{ij} = -(P+Q)\delta_{ij}+S_{ij}$ - компоненты тензора напряжений, S_{ij} - компоненты девиатора напряжений, $P = P_c(\rho/\rho_c)$ - среднее давление, P_c - давление в сплошной компоненте вещества, Q - искусственная вязкость, 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:

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

причем $2W_{ij} = \partial\upsilon_i/\partial x_j - \partial\upsilon_j/\partial x_i$. 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[6].

Для вычисления температуры использовались соотношения [31]:

$$dT = \begin{cases} d(E - E_{0x})/c_p, & \text{если } T < T_m \\ 0, & \text{если } T = T_m, \\ d(E - E_{0x} - \Delta H_m)/c_p, & \text{если } T > T_m \end{cases}$$

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

---

[6] Исследования механических свойств материалов при ударно-волновом нагружении / Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов // Известия РАН. МТТ. - 1999. - № 5. - С. 173 - 188.

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

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, $E_0 = -T_0\, c_p^0$, $E_1 = \gamma_0 E_0$, $E_2 = (a^2 + \gamma_0^2 E_0)/2$, $E_3 = (4ba^2 + \gamma_0^3 E_0)/6$, $E_4 = (-2\gamma_0\, ba^2 + 18a^2 b^2 + \gamma_0^4 E_0)/24$, T_0 - начальная температура.

Для приведенных выше уравнений ставится краевая задача с начальными и граничными условиями. Конкретизация краевых условий для исследуемого класса задач проводится в соответствующих разделах работы. В целом данные условия характеризуются отсутствием в исходном состоянии внутренних напряжений и внешних нагрузок на свободных поверхностях, а на контактных поверхностях реализуются, как правило, условия скольжения. Энергетическим источником взаимодействия служит кинетическая энергия группы ударников (или, в зависимости от условий задачи, одиночного ударника), которые движутся с заданной скоростью под определенным углом к поверхности преграды.

Для решения пространственных задач высокоскоростного соударения используется метод конечных элементов [5, 23], соотношения которого приведены в подразделе 1.2. В подразделе 1.3 в трехмерной постановке рассмотрена задача динамического взаимодействия цилиндрического тела с жесткой стенкой, называемая задачей Тейлора, которую можно рассматривать в качестве тестового примера применения данной численной методики.

Было проведено две серии численных расчетов с использованием экспериментальных данных. В первой серии расчетов было исследовано влияние предварительного нагрева стальных, медных и алюминиевых цилиндров на их прочностные характеристики. Учет влияния предварительного нагрева материала от начальной температуры T_0 = 300 К до текущего значения тем-

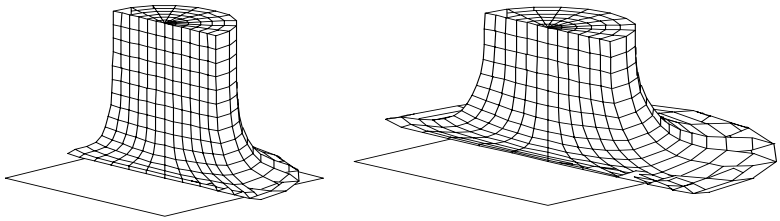
пературы T осуществлялся с помощью зависимостей, полученных на основе экспериментальных данных[7]:

$$G_0^T = G_0^{T_0}\,[1+h\,(T - 300)]\ , \qquad \sigma_0^T = \sigma_0^{T_0}\,[1+h\,(T - 300)]\ . \quad (6)$$

Табл. 1. Сталь 4340.

ρ, кг/м^3	T_0, K	υ_0, м/с	h, K^{-1}	$l_к/l_0$		%
				расчет	эксп.[7]	
7843	300	180	-	0.909	0.907	0.2
7834	300	232	-	0.865	0.862	0.3
7840	730	237	$-1.6\cdot10^{-4}$	0.854	0.794	6.0
7840	730	237	$-6.2\cdot10^{-4}$	0.821	0.794	2.7
7820	1280	180	$-6.2\cdot10^{-4}$	0.819	0.655	16.5

В таблице 1 представлены результаты численных расчетов в сравнении с экспериментальными данными. Критерием сравнения результатов расчета и эксперимента служило отношение конечной длины цилиндра к начальной l_k/l_0. Наблюдается хорошее согласие относительных длин цилиндров, полученных в экспериментах и численных расчетах при нормальной температуре. Варьирование коэффициента h позволяет приблизить численные результаты к экспериментальным значениям при повышенных начальных температурах. Результаты расчетов свидетельствуют, что коэффициент h зависит от температуры нагрева и возрастает с ее ростом.



20 мкс 60 мкс

Рис. 1. Конфигурации стального цилиндра при ударе по жесткой стенке с начальной скоростью 400 м/с. Начальный диаметр цилиндра 12.5 мм, высота – 37.5 мм.

Во второй серии расчетов рассматривалось взаимодействие стального цилиндра по нормали с жесткой стенкой при различных динамических пределах текучести σ. На рис. 1 представлены конфигурации стального ци-

[7] Gust W.H. High impact deformation of metal cylinders at elevated temperatures // J. Appl. Phys. - 1982. Vol. 53, no. 5. - P. 3566 - 3575.

линдрического ударника при ударе с начальной скоростью 400 м/с, конечная форма цилиндра соответствует полученной в экспериментах, проведенных на баллистических стендах НИИ ПММ при ТГУ [2].

Табл. 2. Сталь 4340.

	d_0, мм	l_0, мм	l_0/d_0	υ_0, м/с	l/l_0	d/d_0
данная работа	12.5	37.5	3	400	0.689	2.17
3D расчет[8]	7.62	23.47	3	402	0.693	
2D расчет[9]	7.62	23.47	3	402	0.684	2.15
эксперимент[10]	7.62	23.47	3	402	0.635	
эксперимент [2]	12.5	37.5	3	400	0.641	
данная работа	12.5	37.5	3	250	0.845	1.44
эксперимент [2]	12.5	37.5	3	250	0.837	

В таблице 2 приведены расчетные и экспериментальные данные для стали 4340 плотностью 7850 кг/м^3 и динамическим пределом текучести 1.2 ГПа. Результаты, полученные в данной работе, хорошо согласуются с экспериментальными и численными данными, полученными в России и США.

<u>Раздел 2.</u> Имитационная модель разрушения эрозионного типа в задачах высокоскоростного взаимодействия деформируемых твердых тел (2.1. Проникание удлиненных ударников в массивные преграды; 2.2. Влияние форм ударника и его прочностных характеристик на проникание в пластину и разрушение; 2.3. Влияние тепловых эффектов на процесс высокоскоростного пробивания пластины из фторполимера; 2.4. Высокоскоростное ортогональное резание металлов инструментом из СТМ с учетом разрушения и температурных эффектов). Во втором разделе работы рассматривается модель разрушения эрозионного типа, имитирующая на макроуровне разрушение межзеренных структур контактных слоев материала взаимодействующих тел при высокоскоростном ударе. К настоящему времени эрозионный механизм разрушения взаимодействующих тел при высокоскоростном соударении стал общепризнанным и активно используется в численном моделировании.

---

[8] Johnson G.R., Colby D.D., Vavrick D.J. Three-dimensional computer code for dynamic response of solids to intense impulsive loads // Numer. Meth. Eng. - 1979. - Vol. 14, no. 12. - P. 1865 - 1871.

[9] Johnson G.R. Dynamic response of axisymmetric solids subjected to impact and spin // AIAA Journal. - 1979. - Vol. 17, no. 9. - P. 975 - 979.

[10] Уилкинс М.Л., Гуинан М.У. Удар цилиндра по жесткой преграде // Сб. переводов «Механика». - 1973. - № 3. - С. 112 - 128.

Подобный алгоритм входит, например, в программный комплекс CTH, разработанный в Sandia National Laboratories (Albuquerque, New Mexico, USA). Реализация механизма эрозии и используемые критерии разрушения (срабатывания) могут быть различными. В частности, может предусматриваться переход от конечных элементов к свободно перемешивающимся элементам при эрозионном разрушении. В последнее время встречается термин «абразивный алгоритм», что в сущности идентично эрозионному механизму разрушения, сопровождающемуся потерей массы соударяющихся тел. Также получил интенсивное развитие метод SPH (Smooth Particle Hydrodynamics), где изначально среда моделируется элементами, которые могут свободно перемешиваться. Для многих задач такой подход является достаточно эффективным, однако физические механизмы разрушения контактных слоев материала взаимодействующих тел в нем также не могут быть описаны без соответствующей модели.

В данной работе описывается модель разрушения эрозионного типа [34], имитирующая на макроуровне разрушение межзеренных структур контактных слоев материала взаимодействующих тел при высокоскоростном ударе, разработанная на основе экспериментальных данных[11]. При анализе результатов экспериментов исследовалась микроструктура стержней из вольфрамового сплава диаметром 5.8 мм, удлинением 10 калибров после взаимодействия с полубесконечной преградой из стали средней твердости в диапазоне скоростей встречи 1000 - 2100 м/с. Были исследованы ударники, изготовленные из вольфрамовых сплавов с различными значениями плотности и прочностных характеристик. После выстрела ударник извлекали и разрезали вдоль оси. Микроструктуру ударника после деформации выявляли полировкой и травлением поверхности и исследовали с помощью световой микроскопии. На рис. 2 приведен пример микроструктуры осевого сечения ударника, изготовленного из материала D17 (плотность 17.0 г/см^3, твердость 310 кг/мм^2, размер зерен 34.2 мкм).

Существует предельная степень деформирования зерен вольфрамового сплава, зависящая от скорости удара и типа сплава, после чего материал разрушается в виде срезания зерен - слоев контактной поверхности с последующим выносом разрушенного материала стержня вместе с материалом преграды за пределы области взаимодействия на боковую поверхность кратера. Процесс срабатывания вольфрамовых стержней в виде послойного срезания материала не может быть адекватно описан на макроуровне в

[11] Тем Р.Х., Стилп А.Дж. Механизм деформации спеченных материалов на основе вольфрама при ударном нагружении // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. Мейерса М.А., Мурра Л.Е.: Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1984. - С. 382 - 387.

обычных рамках как эйлерова, так и лагранжева подходов. Корректнее в таких случаях проводить расчет контактной области на микро- и мезоструктурном уровне, однако пока не представляется возможным объединить все три уровня (микро-, мезо-, макро-) для описания явления и получения конечных результатов численного моделирования высокоскоростного соударения.

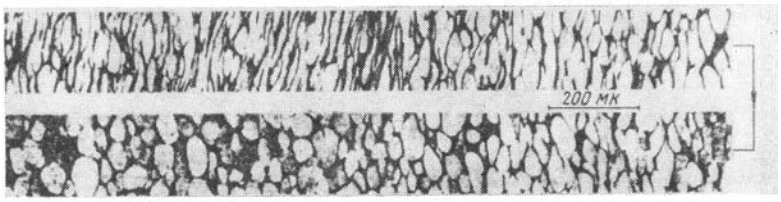


Рис. 2. Микроструктура ударника из вольфрамового сплава D17 после соударения (скорость удара 1399 м/с)[11].

Таким образом, для численных расчетов на макроуровне процессов высокоскоростного деформирования контактных слоев взаимодействующих тел необходимым является введение модельного механизма, имитирующего разрушение межзеренных структур при выполнении критерия разрушения - критерия срабатывания. В данной работе в качестве критерия срабатывания предлагается использовать предельный уровень удельной энергии сдвиговых деформаций.

Текущее значение этой энергии вычисляется с помощью формулы

$$\rho \frac{dE_{sh}}{dt} = S_{ij}\varepsilon_{ij}, \qquad (7)$$

где индексы i, j принимают значения 1, 2, 3 в трехмерном случае. Критическая величина удельной энергии сдвиговых деформаций полагается зависящей от условий взаимодействия и является функцией начальной скорости удара υ_0 с целью моделировать наблюдаемые в эксперименте зависимости

$$E_{sh}^{c} = a_{sh} + b_{sh}\upsilon_0, \qquad (8)$$

где a_{sh}, b_{sh} - параметры модели. Когда

$$E_{sh} > E_{sh}^{c} \qquad (9)$$

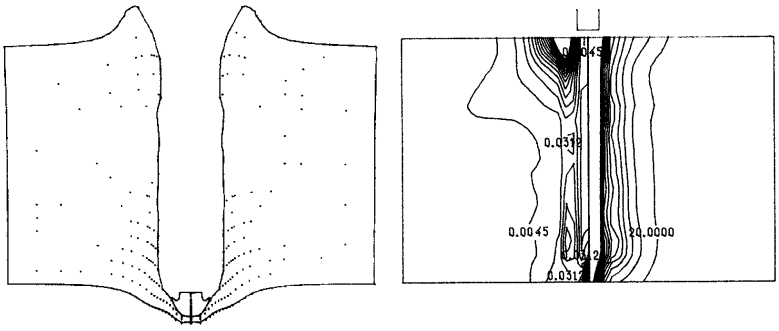
в расчетной ячейке в области контактных границ, эта ячейка считается разрушенной и удаляется из дальнейшего расчета, а параметры соседних ячеек корректируются с учетом законов сохранения.

Корректировка заключается в исключении массы разрушенного элемента из масс узлов, принадлежавших этому элементу. Если при этом масса како-

го-либо узла становится нулевой, то данный узел считается разрушенным и также удаляется из дальнейшего расчета.

На основе имитационной модели разрушения эрозионного типа с помощью численного метода конечных элементов были исследованы процессы взаимодействия удлиненных цилиндрических ударников с массивными преградами при скоростях удара от 1500 до 2500 м/с, рассмотрено влияние форм носовой части ударника и его прочностных характеристик на проникание в преграду и ее разрушение. Имитационная модель разрушения эрозионного типа была применена также при изучении влияния тепловых эффектов на процесс высокоскоростного пробития пластины из фторполимера и при исследовании процессов ортогонального резания металлов инструментом из сверхтвердого материала. Помимо численных исследований, результаты которых изложены в данном разделе работы, имитационная модель разрушения эрозионного типа применялась там, где при высоких скоростях удара выполнялся критерий разрушения (9).

Для момента времени 65 мкс после начала процесса на рис. 3а представлена расчетная конфигурация взаимодействующих тел - ударника из вольфрамового сплава и стальной преграды, на рис. 3б - распределения изолиний удельного объема микроповреждений (слева) и удельной энергии сдвиговых деформаций (справа) в преграде.



а б

Рис. 3. Внедрение удлиненного стержня в массивную преграду. Диаметр стержня d_0 = 5.8 мм, длина l_0 = 58 мм, l_0/d_0 = 10, толщина преграды 65 мм, начальная скорость удара 2000 м/с.

Распределения изолиний удельной энергии сдвиговых деформаций описывают форму вырабатываемого в преграде кратера, что указывает на обоснованность использования в качестве критерия срабатывания предельного уровня удельной энергии сдвиговых деформаций.

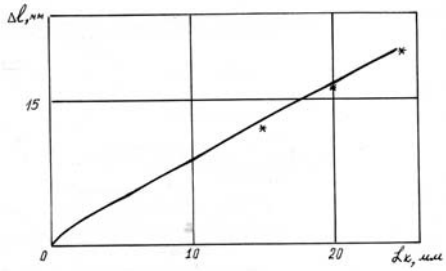
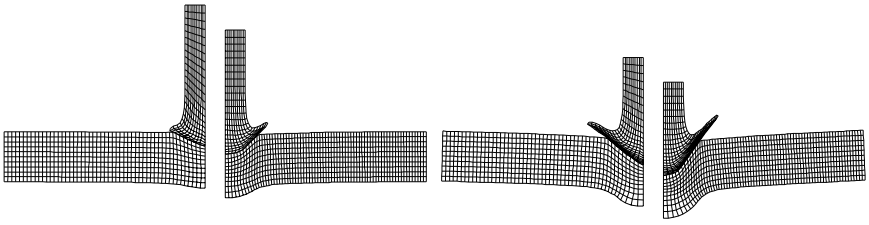


Рис. 4. Сокращение длины стержня Δl при внедрении в плиту на глубину L_k с начальной скоростью удара 1500 м/с; * - экспериментальные данные, полученные в НИИПММ при ТГУ.

В подразделе 2.2 рассмотрено влияние форм ударника и его прочностных характеристик на проникание в пластину и разрушение [37]. Рис. 5 иллюстрирует тот факт, что малопрочный ударник с конической носовой частью, растекаясь, достаточно быстро принимает форму, близкую к имеющей место в случае исходного плоскоторцевого ударника. Единственное существенное отличие состоит в запаздывании по времени как движения тыльной поверхности, так и роста глубины внедрения.



а б

Рис. 5. Радиальные сечения взаимодействующих свинцовых ударников с конической (фрагменты слева) и плоскоторцевой (справа) формой носовой части и титановой пластины в моменты времени 10 (а) и 20 (б) мкс.

Рис. 6 демонстрирует качественное подобие формируемых в преграде областей повреждений. В обоих случаях в преграде формируются обширные области тыльных откольных повреждений, резко снижающие ее защитные свойства. Остаток ударника пробивает ослабленную преграду, при этом форма носовой части ударника из малопрочного материала не оказывает определяющего влияния на итоговый результат. Приведенные выше численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в НИИПММ при ТГУ.

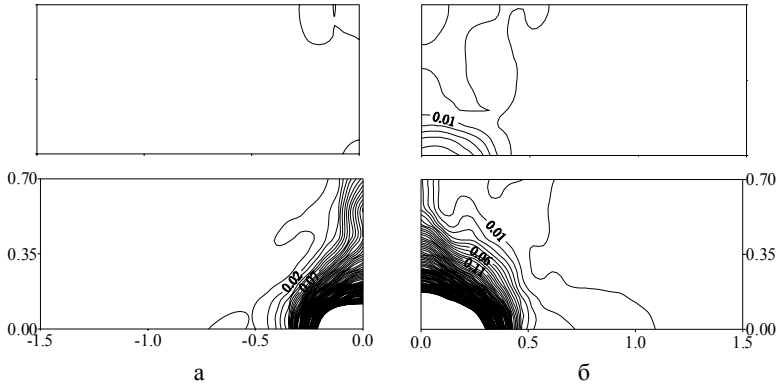


Рис. 6. Изолинии удельного объема микроповреждений (см^3/г) в половине радиального сечения пластины в моменты времени 5 (верхние фрагменты) и 30 (нижние) мкс для конического (а) и плоскоторцевого (б) свинцовых ударников.

В подразделе 2.3 изложены результаты исследования влияния тепловых эффектов на процесс высокоскоростного пробивания пластины из фторполимера [15].

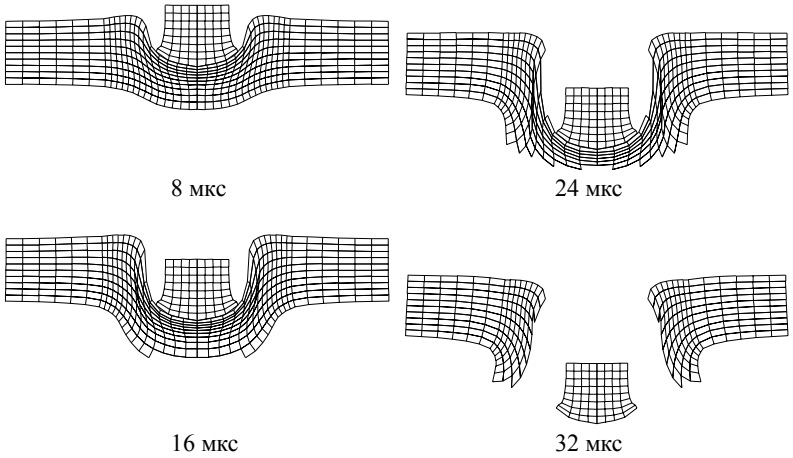


Рис. 7. Стадии перфорирования полимерной пластины стальным ударником с начальной скоростью 600 м/с.

На рис. 7 представлены расчетные хронограммы процесса взаимодействия ударника с фторполимерной пластиной. Расчеты свидетельствуют, что

при скорости встречи 600 м/с происходит сквозное пробитие пластины, при этом ударник заметно деформируется.

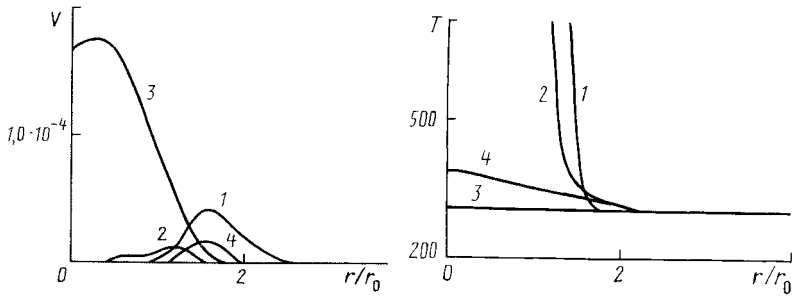


Рис. 8. Распределения удельного объема микроповреждений V ($м^3$/кг) и температуры T (K) в характерных сечениях пластины вдоль радиуса: 1 - на лицевой поверхности через 5 мкс после начала взаимодействия; 2 - на срединной через 5 мкс; 3 - на тыльной через 5 мкс; 4 - на лицевой через 2.5 мкс; r_0 – радиус ударника; начальная скорость ударника 1000 м/с.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют, что интенсивный разогрев в верхней части фторполимерной пластины в рассмотренном диапазоне условий высокоскоростного удара приводит в этой области к плавлению и термической деструкции. В нижней части пластины происходит механическое разрушение фторполимера, но подверженная ему область занимает относительно меньший объем материала.

В подразделе 2.4 в плоской постановке исследована задача о высокоскоростном ортогональном резании металлов инструментом из сверхтвердого материала (СТМ) в диапазоне скоростей резания от 1 до 200 м/с [21]. Получаемые в расчетах конфигурации тел (модели заготовки, отделяемой стружки и рабочей части режущего инструмента) приведены на рис. 9. Размеры рабочей части инструмента: длина верхней грани 1.25 мм, боковой 3.5 мм, передний и задний углы 6^0. Обрабатываемая стальная пластина имела толщину 5 мм, глубина резания - 1 мм. Моделирование процесса отделения стружки от заготовки осуществлялось с использованием критерия разрушения расчетных элементов заготовки вдоль линии резания, при этом использовался подход, аналогичный моделированию разрушения материала эрозионного типа. В качестве критерия разрушения – критерия отделения стружки – применялось предельное значение удельной энергии сдвиговых деформаций.

Расчеты показывают, что распределение уровней температур практически идентично распределению уровней энергии сдвиговых деформаций, что

свидетельствует о том, что температурный режим при высокоскоростном резании определяется пластическим деформированием заготовки.

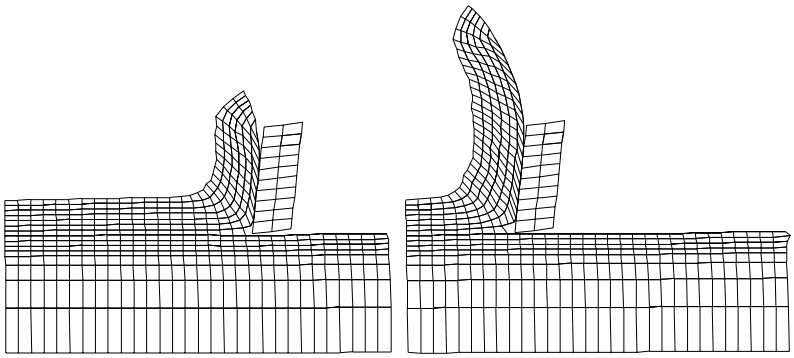


Рис. 9. Форма стружки в моменты времени 90 и 180 мкс при скорости резания 50 м/с.

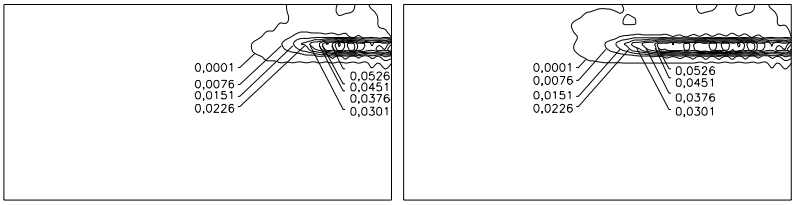


Рис. 10. Линии уровней удельного объема микроповреждений (в $см^3/г$) в моменты времени 40 и 80 мкс при скорости резания 50 м/с.

На основании полученных результатов расчетов установлено, что характер распределения линий уровней удельной энергии сдвиговых деформаций и температур при сверхвысоких скоростях резания такой же, как и при скоростях резания порядка 1 м/с, а качественные различия в режиме могут возникать вследствие плавления материала заготовки, которое происходит лишь в узком контактируемом с инструментом слое. Выявлено, что в качестве критерия отделения стружки при высокоскоростном резании металлов предпочтительно использовать предельное значение удельного объема микроповреждений, распределения линий уровней которого локализуются вдоль плоскости резания.

<u>Раздел 3.</u> Разрушение керамических преград при взаимодействии с ударником и группой тел в диапазоне скоростей встречи 100 - 4000 м/с (3.1. Моделирование поведения керамических преград на основе оксида

алюминия в широком диапазоне скоростей нагружения; 3.2. Формирование устойчивых вихревых структур в керамических пластинах на стадии предразрушения; 3.3. Особенности разрушения керамических преград конечной толщины стальными ударниками в диапазоне скоростей удара 600 - 4000 м/с; 3.4. Разрушение керамической пластины при последовательном нагружении группой из двух идентичных тел). В третьем разделе работы представлены результаты численного моделирования поведения керамических преград на основе оксида алюминия в широком диапазоне скоростей соударения. Модель широкодиапазонного типа, предложенная и применяемая в работе и описывающая поведение высокопрочных керамик как при относительно низких скоростях нагружения (скорости удара порядка нескольких сотен м/с), так и при достаточно высоких (порядка нескольких тысяч м/с), включает кинетическую модель разрушения активного типа, учитывает возможность разрушения керамики при превышении в ударной волне предела упругости, использует степенную зависимость прочностных характеристик керамики от достигнутого уровня поврежденности, описывающую падение прочностных свойств (динамического предела текучести) при заданных значениях удельного объема трещин. Формула (5) для динамического предела текучести при моделировании поведения керамических материалов приобретает вид (10).

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 K_T \left(1 - \frac{V_f}{V_4}\right), \text{если } V_f < V_f^k \\ \sigma_f K_T, \text{если } V_f^k \le V_f < V_4 \\ 0, \text{если } (V_f \ge V_4 \text{ или } \sigma_{sw} < P_{fr}) \end{cases}, \qquad (10)$$

где σ_{sw} - напряжение в ударной волне ($\sigma_{sw} < 0$ при сжатии); V_f^k, σ_f, P_{fr} - константы.

Графики зависимости модуля сдвига (5) и динамического предела текучести (10) от удельного объема микроповреждений для керамики AD85 представлены на рис. 11. На этапе разработки и тестирования модели проводились сравнения с экспериментальными данными[12], полученными в Sandia National Laboratories. В экспериментах и расчетах рассматривалось взаимодействие ударника (керамической пластины толщиной 5 мм, диаметром 87.5 мм) с керамической пластиной (исследуемым образцом) толщиной 10 мм, диаметром 76.2 мм. Находящееся позади образца окно из

[12] Grady D.E., Moody R.L. Shock compression profiles in ceramics // Sandia National Laboratories Report, SAND96-0551, 1996. - 155 p.

мм, диаметром 76.2 мм. Находящееся позади образца окно из фторида лития было толщиной 25.4 мм и диаметром 50.8 мм.

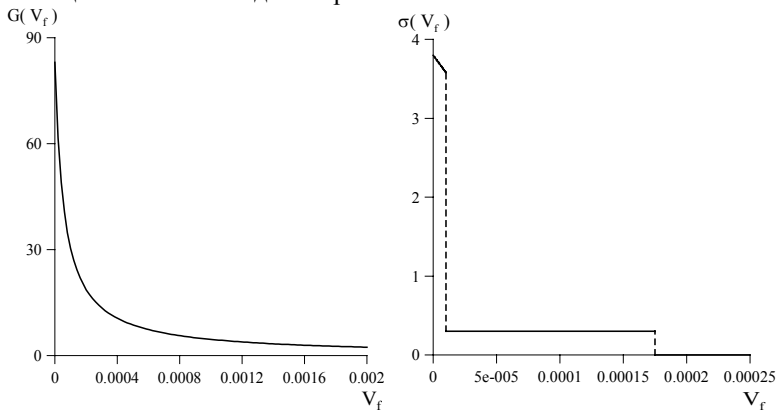


Рис.11. Зависимость модуля сдвига и динамического предела текучести (ГПа) от удельного объема микроповреждений ($м^3$/кг).

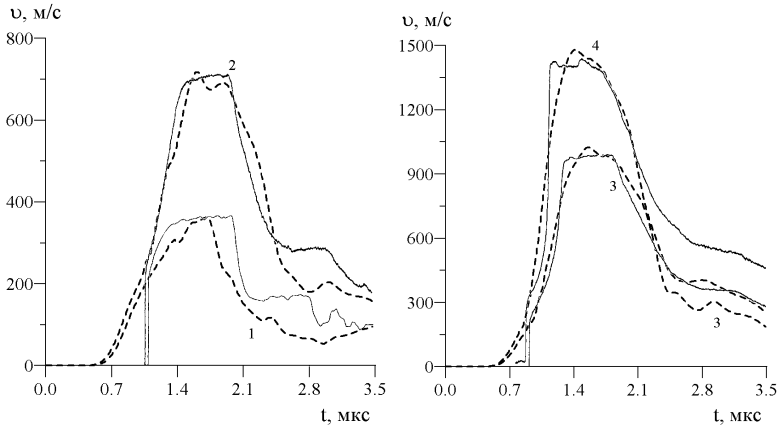


Рис. 12. Скорости тыльной поверхности керамической пластины для различных скоростей удара. Сплошная линия – эксперимент[12], пунктирная - расчет.

Временные зависимости скоростей контактной поверхности керамический образец - фторид лития для различных начальных скоростей удара (кривая 1 соответствует начальной скорости удара υ_0 = 544 м/с; 2 - υ_0 = 1070 м/с; 3 - υ_0 = 1573 м/с; 4 - υ_0 = 2329 м/с) представлены на рис. 12. Для сравнения там же приведены экспериментальные кривые. Полученные расчетные профили скоростей контактной поверхности керамический образец -

окно из фторида лития находятся в хорошем соответствии с данными экспериментов.

В подразделе 3.2 исследовано формирование устойчивых вихревых структур в керамических пластинах на стадии предразрушения [24].

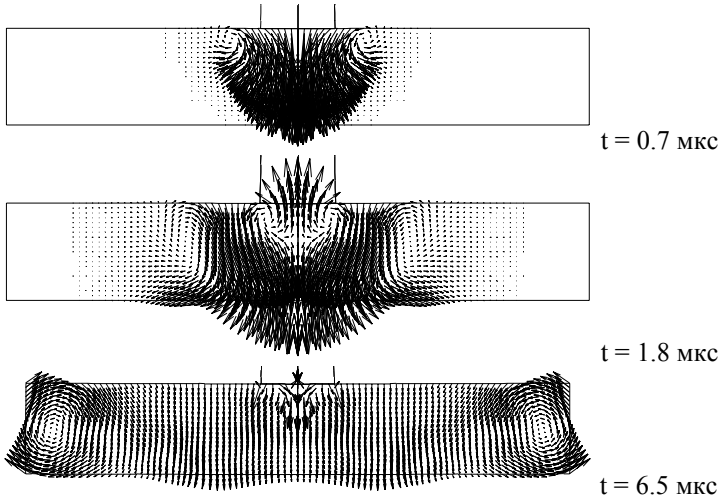


Рис. 13. Поля скоростей в осевом сечении керамической пластины в различные моменты времени при начальной скорости удара 100 м/с.

При нагружении со скоростью 100 м/с в керамической пластине образуется волна сжатия, распространяющаяся в направлении тыльной и боковой поверхностей (рис. 13). Одновременно на свободной лицевой поверхности рядом с ударником возникает волна разрежения. Взаимодействие этих двух волн на начальном этапе процесса приводит к формированию вихревой структуры, расположенной в приповерхностном лицевом слое материала керамической пластины. Вихрь продолжает смещаться вдоль пластины, одновременно перемещаясь вглубь. В момент времени 1.8 мкс центр данной структуры располагается примерно в срединном слое керамической пластины. В дальнейшем, продолжая смещаться вдоль пластины к ее боковой поверхности, центр вихря к 4 мкс выходит к тыльной поверхности пластины. Перемещаясь затем в срединные слои пластины, вихрь к 5.5 мкс выходит к ее боковой поверхности. Рис. 13 в момент времени 6.5 мкс иллюстрирует этап наибольшего развития данной вихревой структуры, охватывающей всю толщину керамической пластины. Центр вихря находится в срединных слоях пластины и отстоит от ее боковой поверхности примерно на половину толщины. Анализ расчетов показывает, что основным вихреобразующим

фактором является распространение в керамической пластине волн давления, имеющих разные знаки.

При использовании стальной пластины тех же размеров не наблюдается областей со столь же ярко выраженным вихревым движением материала. Вихрь в области боковой поверхности, наиболее выраженная вихревая структура в керамике, в стальной пластине не формируется.

В подразделе 3.4 представлены результаты расчетов последовательного взаимодействия двух идентичных стальных цилиндров с керамической пластиной на основе оксида алюминия Al_2O_3. Диаметр цилиндров был выбран 5.56 мм, высота 18.5 мм, толщина керамической пластины составила 7 мм, диаметр 52 мм. Начальная скорость цилиндров в обоих случаях была задана 500 м/с. На рис. 14 представлены хронограммы процессов соответственно первого (до момента времени 40 мкс) и второго нагружения одной и той же керамической пластины двумя стальными цилиндрами.

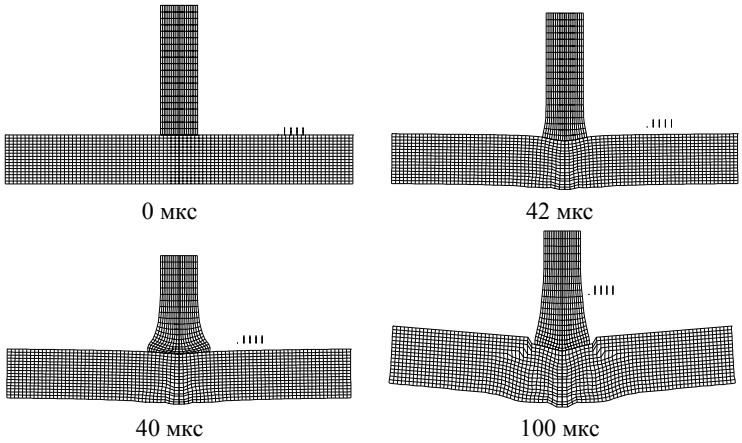


Рис. 14. Конфигурации стального цилиндра и керамической пластины при последовательном нагружении двумя ударниками.

При повторном ударе характер разрушения керамики качественно меняется. На начальном этапе повторного нагружения на лицевой поверхности керамической преграды возникает новый очаг разрушений, обусловленный внедрением ударника в ослабленную в ходе первого удара керамическую преграду, а не его растеканием вдоль поверхности преграды, как это наблюдалось при первом ударе. В дальнейшем данный очаг распространяется вглубь преграды под некоторым углом к лицевой поверхности с одновременным ростом в нем уровня поврежденности. К 80 мкс (рис. 15) формиру-

ется промежуточный очаг с образованием объединенной области разрушений, подобной имеющей место при скоростях удара 1500 м/с и выше [22].

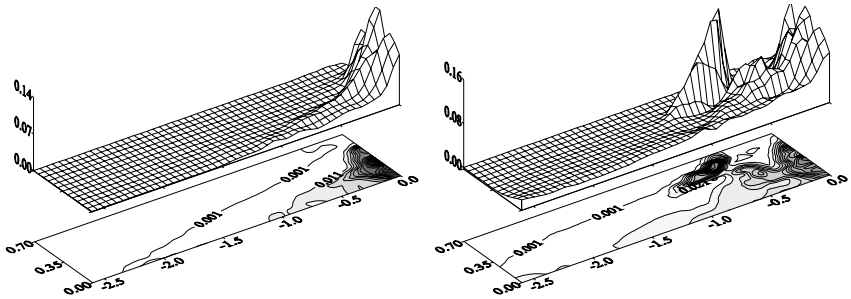


Рис. 15. Поверхности и изолинии удельного объема трещин в радиальном сечении керамической преграды при первом ударе в момент времени 40 мкс (слева) и втором в 80 мкс (справа). Интервал между уровнями составляет 0.01 см^3/г.

К 100 мкс данная объединенная область с тремя экстремумами (у оси симметрии в тыльной области, около лицевой поверхности и промежуточный между ними) значительно увеличивается в размерах, демонстрируя особенности разрушения, характерные для фрагментации центральной части керамической преграды с образованием сквозного отверстия конусообразного вида.

<u>Раздел 4.</u> Удар под углом группы из двух частиц по преграде конечной толщины (4.1. Синхронный удар двух частиц по пластине при углах подхода обеих частиц 15^0 и 30^0; 4.2. Синхронное контактирование с пластиной двух сходящихся частиц при углах подхода обеих частиц 15^0 и 30^0; 4.3. Синхронное взаимодействие двух частиц с пластиной при движении обеих частиц под углом 60^0 в одном направлении; 4.4. Разновременный удар двух частиц, движущихся под углом 60^0 в одном направлении; 4.5. Разновременный удар двух сходящихся частиц). В четвертом разделе работы рассматриваются процессы взаимодействия двух частиц при ударе под углом по преграде конечной толщины в широком диапазоне изменения начальных условий соударения.

Среди разнообразных задач конечной баллистики актуальными и малоисследованными являются случаи воздействия на преграду нескольких тел. Это может быть как группа ударников различных типов, так и поток вторичных осколков, образовавшихся в результате разрушения преграды после первичного одиночного удара. В общем случае могут варьироваться геометрические параметры взаимодействующих тел, скорости и углы подхода час-

тиц к преграде, пространственные и временные интервалы процесса. Соответственно может варьироваться степень влияния каждого отдельно взятого процесса контактирования на остальные.

Подобные задачи становятся все более актуальными в проблеме защиты космических аппаратов и их модулей в связи с интенсивным развитием космических исследований и накоплением в околоземном пространстве техногенного «мусора». Не менее актуальной в настоящее время является проблема защиты от террористических актов различного рода. Могут использоваться средства поражения, формирующие поток высокоскоростных элементов, также может образовываться поток осколков в запреградном пространстве, при этом требуется обеспечить защиту как индивидуальную, так и средств передвижения и сооружений.

Экспериментальные исследования в данной области незначительны, что в первую очередь связано со сложностью реализации в эксперименте группового соударения и проблемой управляемости потоком высокоскоростных частиц. Можно отметить работы [26, 40], в которых представлены экспериментальные результаты разрушения преграды при нормальном ударе по ней практически одновременно нескольких компактных частиц при вариации плотности потока (числа частиц в потоке и расстояний между ними).

В данном разделе анализируются особенности деформирования и разрушения преграды конечной толщины при синхронном и разновременном высокоскоростном ударе по ней двух идентичных частиц. Варьировались углы подхода частиц в диапазоне 15^0 - 60^0, при этом частицы двигались как в одном направлении, так и навстречу друг другу. Варьировались также начальные расстояния между частицами и временной интервал между началом взаимодействия каждой из частиц с преградой с целью охватить весь спектр возможного взаимовлияния, начиная от случая, когда каждый процесс взаимодействия протекает независимо, и кончая случаем совместного развития процесса, аналогичного удару одного элемента большего размера.

На рис. 16 представлены конфигурации тел и распределения полей скоростей в пластине в моменты времени 2 и 6 мкс после начала взаимодействия. Размеры частиц в сечении были 8 × 8 мм, толщина пластины 10 мм, начальная скорость соударения обеих частиц с пластиной составила 2690 м/с в большинстве расчетов, дополнительные расчеты были проведены для скоростей встречи 1800 и 900 м/с. Расчетные конфигурации на рис. 16 соответствуют углам подхода $+30^0$ и -30^0, расстоянию между точками касания 37 мм, разновременности начала взаимодействия 2 мкс.

Рис. 17, где даны распределения изолиний удельного объема микроповреждений в момент времени 8 мкс, иллюстрирует характер разрушения и деформирования пластины при синхронном процессе контактирования час-

тиц с начальными расстояниями между точками касания 27 (верхний фрагмент) и 37 (нижний) мм и при разновременном контактировании с начальным расстоянием 37 мм и интервалами по времени 2 (верхний фрагмент) и 4 (нижний) мкс.

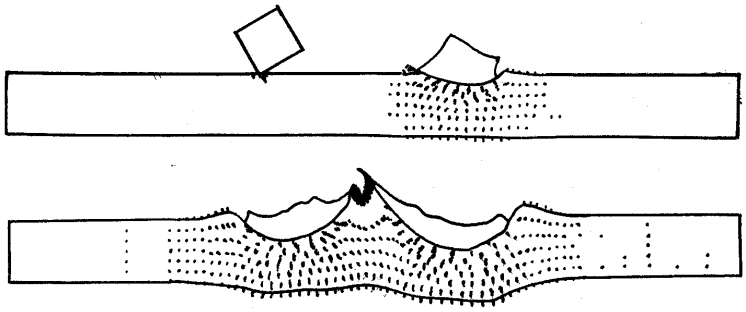
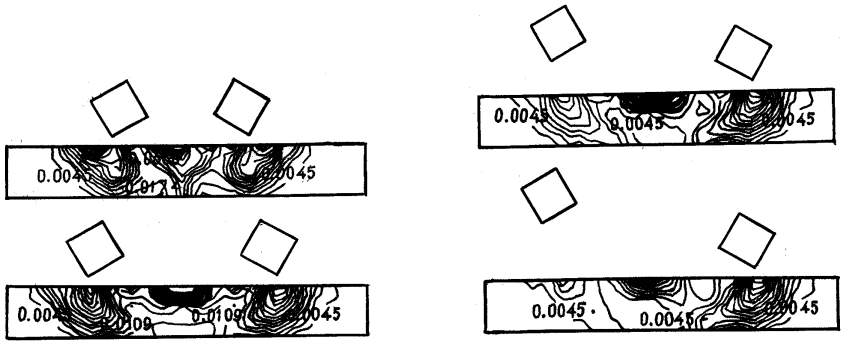


Рис. 16. Хронограммы разновременного сходящегося внедрения двух частиц в пластину для моментов времени 2 и 6 мкс при угле подхода 30^0.



а б

Рис. 17. Распределения изолиний удельного объема микроповреждений в пластине в момент времени 8 мкс при синхронном (а) и разновременном (б) взаимодействии двух частиц с пластиной при вариации пространственных и временных интервалов.

Результаты широкодиапазонных численных исследований в плоской постановке синхронного контактирования двух компактных в сечении частиц, движущихся в одном направлении со скоростью около 3000 м/с, с пластиной при варьировании углов встречи и расстояния между частицами показывают, что характер деформирования и развитие разрушения в пластине существенно зависят от расстояния между частицами и могут быть изолиро-

ванными, слитными, промежуточными. На лицевой поверхности пластины при начальном расстоянии между центрами частиц порядка $3d_0$ и более, где d_0 - характерный размер частицы, образуются 4 очага микроповреждений, средние из которых могут взаимодействовать между собой и объединяться в один. При начальном расстоянии порядка $2d_0$ в пластине в зоне взаимовлияния образуется один общий очаг микроповреждений, который при угле подхода 60^0 от нормали в дальнейшем полностью закрывается. При углах подхода 15^0 и 30^0 в этом случае из пластины выбивается один фрагмент шириной в 1.5 - 2 раза большей, чем в случае удара одиночной частицы, на тыльной поверхности пластины образуется дополнительный третий, центральный очаг откольного разрушения, обусловленный интерференцией волн разгрузки, который при большем начальном расстоянии между частицами не формируется. При встречном движении частиц и начальном расстоянии между ними порядка $4.5d_0$ важную роль в развитии микроповреждений на лицевой поверхности пластины играют интерферирующие волны разряжения, при расстояниях между частицами $3.5d_0$ и менее очаг разрушения на лицевой поверхности пластины подавляется сближающимися частицами, а их взаимовлияние проявляется в формировании общего очага откольного разрушения на тыльной поверхности пластины.

При углах подхода обеих частиц до 30^0 и расстояниях между ними более $4.5d_0$ при движении в одном направлении их взаимное влияние на процесс развития повреждений в преграде несущественно, процесс в целом в этом случае можно рассматривать как совокупность независимых воздействий одиночных частиц.

При разновременном высокоскоростном ударе двух частиц под углом 60° контактирующая второй частица в условиях как интерференции разновременных ударно-волновых процессов, так и воздействия на материал пластины, уже имеющий значительные повреждения, вызванные ударом лидирующей частицы, формирует на лицевой поверхности пластины очаги микроповреждений, в которых максимальный уровень удельного объема трещин превосходит обычный в 1.5 - 3 раза для исследованных условий взаимодействия. Контактирующая второй частица заметно подавляет ближайший очаг лицевого повреждения в пластине, формируемый лидирующей частицей, что особенно заметно проявляется при начальном расстоянии между частицами порядка характерного размера самой частицы. Процесс взаимодействия второй частицы при таком расстоянии характеризуется значительным уменьшением тенденции к рикошету.

При встречном разновременном движении двух частиц наблюдается комбинирование факторов, характерных для встречного синхронного движения частиц и для разновременности процессов их контактирования с пла-

стиной. Процесс взаимодействия подлетающей второй частицы при пространственных интервалах $3.5d_0$ – $4.5d_0$ и временных 2 – 4 мкс характеризуется тенденцией к нормализации вектора скорости центра масс с одновременным падением его модуля. Для лидирующей частицы разновременность взаимодействия проявляется в замедлении падения модуля скорости ее центра масс.

Определяющим фактором возникновения выявленных в расчетах дополнительных зон разрушения является интерференция волн разрежения. Фактором, определяющим характер дальнейшего изменения этих зон, становится взаимное влияние внедряющихся частиц.

Раздел 5. Численное моделирование в трехмерной постановке удара группы высокоскоростных частиц по преграде (5.1. Моделирование процессов соударения высокоскоростных частиц с преградами различных типов; 5.2. Синхронный удар группы высокоскоростных частиц по нормали к преграде; 5.3. Взаимодействие группы частиц с преградой при ударе под углом). В пятом разделе работы представлены результаты численных расчетов процессов одиночного и группового удара, проведенные в трехмерной постановке. В подразделе 5.1 анализируются процессы соударения одиночного ударника с деформируемой и недеформируемой преградой при варьировании скорости удара и угла встречи, а также формы ударника. Выявлены особенности деформирования профилированного ударника при нормальном ударе и ударе под углом, с наполнителем в полости и без него, при скорости соударения 1000 м/с. Описаны закономерности, отличающие поведение профилированных ударников от монолитных, взаимодействующих с недеформируемой преградой. Установлено, что волновой характер высокоскоростного взаимодействия стальных ударников с недеформируемой преградой при ударе под углом проявляется в случаях, когда вертикальная составляющая скорости ударника превышает 800 м/с. Зоны максимальных разрушений располагаются как вблизи контактной поверхности, так и в свободных приповерхностных областях ударника (боковой и верхней), тогда как область максимальных температур находится вблизи контактной поверхности. При угле взаимодействия 60^0 области и максимальных температур, и максимальных разрушений в ударнике в течение всего процесса остаются локализованными вблизи контактной поверхности. Изучена динамика деформирования и разрушения разноплотных ударника и преграды в диапазоне скоростей встречи 1000 – 3500 м/с и при угле подхода 30^0. Показано, что при скорости 3500 м/с ударник практически полностью разрушается, а форма кратера в преграде, получаемая в расчетах, хорошо согласуется с результатами экспериментов.

В подразделах 5.2 и 5.3 моделируется взаимодействие группы ударников (до четырех в группе) с преградой конечной толщины при ударе по нормали и под углом, соответственно.

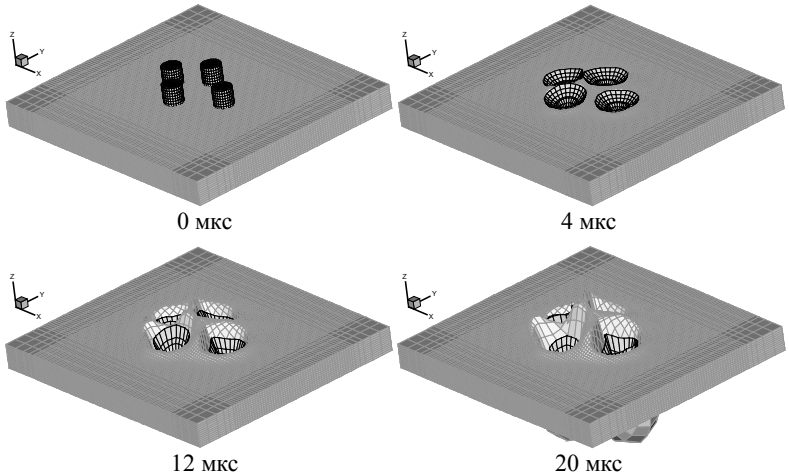


Рис. 18. Хронограммы синхронного взаимодействия по нормали четырех идентичных цилиндрических ударников с преградой.

На рис. 18 представлены хронограммы взаимодействия четырех ударников диаметром и высотой 6 мм, с преградой толщиной 8 мм. Начальная скорость каждого ударника составила 2873 м/с. Начальные расстояния между их центрами были выбраны следующим образом: между двумя крайними ударниками (через оси которых проходила плоскость симметрии) это расстояние составило 22.3 мм, два других были расположены симметрично на расстоянии 11.4 мм от одного ударника и 15 мм от другого. Материал взаимодействующих тел – сталь. На рис. 19 представлены поля удельного объема микроповреждений в преграде, иллюстрирующие интенсивное взаимодействие процессов с образованием совместных областей повреждений, при этом экстремумы наблюдаются в основном в приповерхностных слоях преграды (лицевые и тыльные области откольных разрушений).

На рис. 20 представлен полученный в численном расчете и в эксперименте вид тыльной стороны преграды для случая синхронного взаимодействия с ней четырех ударников. Взаимное влияние индивидуальных процессов на разрушение преграды существенно зависит от начального расстояния между ударниками. Относительные расстояния в данном случае составили $1.9d_0$ между первым ударником, через который проходит плоскость симмет-

рии, и промежуточными ударниками, и $2.5d_0$ между промежуточными и последним ударником. В результате формируется общая для всех четырех ударников область тыльного откола. Три сквозных отверстия в преграде, соответствующие трем ближе расположенным частицам, соединяются между собой, а сквозное отверстие, соответствующее четвертому, несколько более удаленному ударнику, остается изолированным. Экспериментальные данные и численные результаты, полученные в проведенных в трехмерной постановке расчетах, качественно хорошо согласуются.

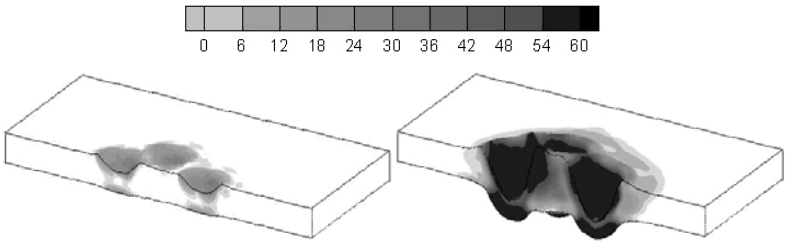
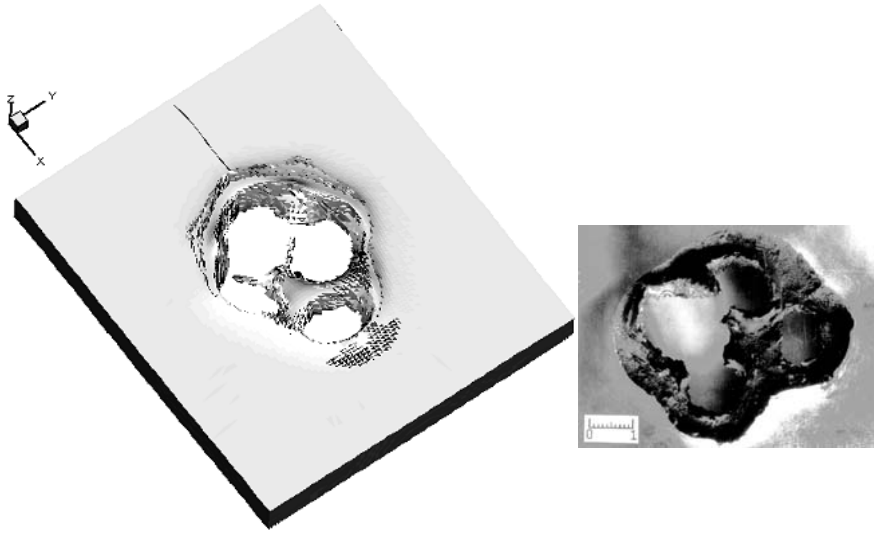


Рис. 19. Контуры преграды (ее симметричной половины) и поля удельного объема микроповреждений в ней (в $см^3/кг$) в моменты времени 2 и 8 мкс.



а б

Рис. 20. Вид тыльной стороны преграды после синхронного удара группы из четырех частиц: а – численный расчет, б - фотография, полученная в результате экспериментов, проведенных в НИИПММ при ТГУ [26, 40].

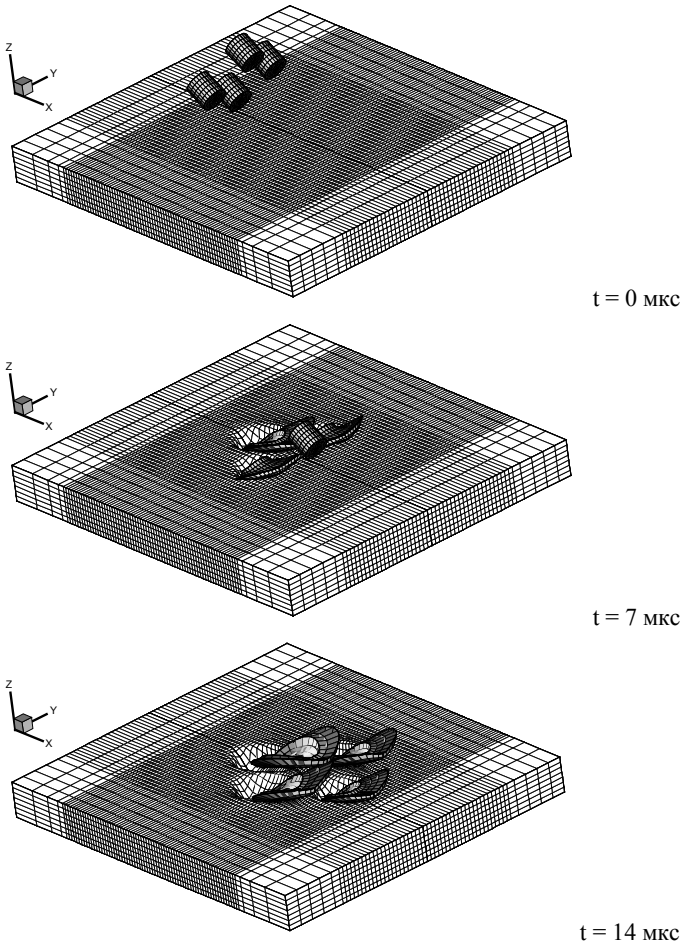
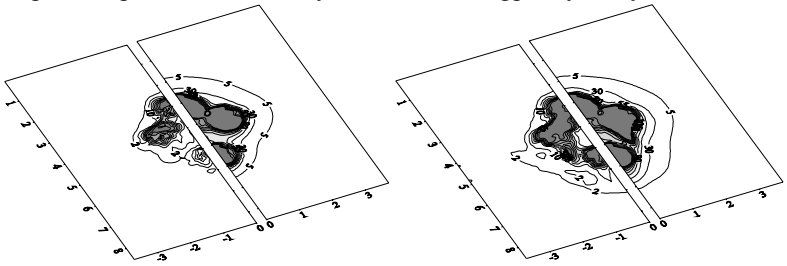


Рис. 21. Компьютерные хронограммы фронтального взаимодействия группы из четырех компактных тел с пластиной под углом 60^0 с начальной скоростью удара 2873 м/с.

Численное моделирование заключительных стадий процесса высокоскоростного взаимодействия, сопровождающихся значительными деформациями и разрушением, становится необходимым при описании разновременного удара группы частиц, когда начальный этап контактирования с преградой последней частицы совпадает с заключительными стадиями с участием первой. В качестве критериев полного разрушения было использовано критиче-

ское значение удельного объема микроповреждений, а также критическое значение удельной энергии сдвиговых деформаций. Применение критериев полного разрушения материала позволило провести расчеты внедрения и рикошета всей группы модельных осколков при произвольных углах подхода и вариации расстояний между частицами по фронту и глубине.



а б

Рис. 22. Изолинии удельного объема микроповреждений (слева, $\Delta V_f = 8$ см^3/кг) и удельной энергии сдвиговых деформаций (справа, $\Delta E_{sh} = 25$ кДж/кг) вдоль лицевой поверхности преграды в моменты времени 7 (а) и 17 мкс (б).

Представленные на рис. 22 распределения изолиний иллюстрируют слияние зон повреждений и деформирования первого и промежуточных ударников, имеющее место при начальных расстояниях между ударниками $1.9d_0$. Зона, обусловленная воздействием последнего ударника, несколько отстоит от объединенной области вследствие более позднего начала соударения и большего начального расстояния между ударниками, составлявшего $2.5d_0$. Кроме того, на рис. 22б наблюдается дополнительный очаг повреждений между последним и средними ударниками, возникновение которого обусловлено их взаимным влиянием, что в итоге вызывает формирование неравномерной структуры откольных повреждений в пластине, близкой по форме к эллиптической.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью созданной численной методики, включающей имитационную модель разрушения эрозионного типа, можно исследовать и прогнозировать поведение элементов конструкций при высокоскоростном взаимодействии с ударником и группой тел в широком диапазоне изменения начальных условий нагружения. Полученные результаты и созданные методики внедрены и используются в ОАО НИИ стали (г. Москва), Кыргызско-Российском славянском университете (г. Бишкек, Кыргызская Республика), также они могут использоваться в организациях, занимающихся изучением

поведения материалов в условиях высокоскоростных нагрузок: РФЯЦ-ВНИИЭФ (г. Саров, Нижегородская обл.), РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск, Челябинская обл.), ИТЭС ОИВТ РАН (г. Москва), ИПХФ РАН (п. Черноголовка, Московская обл.), ИГиЛ СО РАН (г. Новосибирск) и других.

Основные выводы по работе заключаются в следующем:

1. Предложена модель разрушения эрозионного типа, имитирующая на макроуровне разрушение межзеренных структур контактных слоев взаимодействующих тел при высокоскоростном ударе. Обоснован выбор критерия разрушения - предельного уровня удельной энергии сдвиговых деформаций. Предложена зависимость данного критерия от условий взаимодействия (начальной скорости удара), выполнено сравнение численных результатов по прониканию удлиненных стержней из вольфрамового сплава в массивные стальные преграды, с экспериментальными данными, показавшее их хорошее соответствие. Создана численная методика для исследования процессов деформирования и разрушения элементов конструкций при высокоскоростном взаимодействии с ними ударника и группы тел, включающая предложенную имитационную модель разрушения.

2. В плоской постановке проведены исследования процессов синхронного и разновременного контактирования группы из двух компактных частиц с пластиной при варьировании начального расстояния между частицами, углов подхода, направления движения, временных интервалов. Установлено, что определяющим фактором возникновения выявленных в расчетах дополнительных зон разрушения является интерференция волн разрежения. Фактором, определяющим характер дальнейшего изменения этих зон, становится взаимное влияние внедряющихся частиц. Оценено влияние начальных параметров на степень взаимовлияния частиц и характер разрушения преграды при групповом ударе.

3. В трехмерной постановке проведены исследования процессов высокоскоростного взаимодействия группы компактных тел с преградой конечной толщины при ударе по нормали и под углом при варьировании углов подхода к преграде и начальных расстояний между ударниками. Установлено, что при ударе группы частиц диаметром d_0 по преграде толщиной, близкой к диаметру частицы, при расстояниях между центрами частиц $3.5d_0$ и более, каждый процесс взаимодействия протекает независимо друг от друга. При расстояниях $2.5d_0$ области лицевых и тыльных откольных разрушений объединяются, при этом в преграде возникают дополнительные, обусловленные взаимным влиянием частиц, очаги микроповреждений, формируя структуру областей разрушений, близкой по форме к эллиптической. При расстояниях $1.9d_0$ объединяются также кратеры, соответствующие частицам, образуя общее сквозное отверстие в преграде.

4. В трехмерной постановке проведен анализ процесса соударения одиночного ударника с недеформируемой и деформируемой преградой при варьировании скорости удара, угла подхода, профиля ударника. Выявлены особенности деформирования ударника из стали, имеющего полость с малопрочным наполнителем и без него, при нормальном ударе и ударе под углом.

5. Проведен анализ и показано влияние конической и плоскоторцевой форм носовой части ударника и его прочностных характеристик на возможность формирования в пластине областей откольных разрушений при ударе.

6. Исследованы распределения тепловых и механических параметров, реализующихся в процессе взаимодействия стального ударника с полимерной пластиной в диапазоне скоростей удара 300 – 2000 м/с. Установлено, что интенсивный разогрев в верхней части фторполимерной пластины в рассмотренном диапазоне условий нагружения приводит в этой области к плавлению и термической деструкции. В нижней части пластины происходит механическое разрушение фторполимера, но подверженная ему область занимает относительно меньший объем материала.

7. Предложена методика численного расчета процессов ортогонального резания металлов инструментом из сверхтвердого материала в диапазоне скоростей резания 1 – 200 м/с, включающая кинетическую модель разрушения активного типа. Определено, что в качестве критерия отделения стружки предпочтительно использовать предельное значение удельного объема микроповреждений, распределения линий уровня которого локализуются вдоль плоскости резания.

8. Предложена методика описания поведения высокопрочных керамических материалов в диапазоне скоростей ударно-волнового нагружения 100 – 4000 м/с. Проведено тестирование методики на керамике на основе оксида алюминия, получено хорошее соответствие временных зависимостей скоростей тыльной поверхности керамической преграды с экспериментальными данными. Выявлена динамика формирования областей разрушения в керамической преграде в зависимости от скорости удара.

9. Исследована динамика образования устойчивых вихревых структур в керамических пластинах на стадии предразрушения при ударе цилиндрическим ударником с начальной скоростью 100 - 1000 м/с. Установлено, что основной причиной вихреобразования является волновой фактор. Выявлено, что вихревая структура в периферийной боковой области пластины, являющаяся наиболее выраженной вихревой структурой в керамике, в стальной пластине не формируется.

10. Установлено, что при последовательном нагружении керамической пластины группой из двух ударников с относительно низкой скоростью в

условиях, когда после первого удара керамическая преграда сохраняет целостность, повторное нагружение при тех же условиях приводит к ее разрушению. Характер разрушений при повторном ударе подобен имеющему место при одиночном ударе со значительно более высокими скоростями.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Хорев И.Е., Горельский В.А., Зелепугин С.А. Исследование релаксационных эффектов в пластине при синхронном контактировании с ней двух частиц // Третье Всес. совещание по детонации. Доклады. - Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН. - 1985. - С. 161 - 162.
2. Поведение тел вращения при динамическом контакте с жесткой стенкой / А.Н. Богомолов, В.А. Горельский, С.А. Зелепугин, И.Е. Хорев // ПМТФ. - 1986. - № 1. - С. 161 - 163.
3. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Хорев И.Е. Численное исследование развития повреждений в пластинах при двукратном импульсном нагружении // Фундаментальные проблемы физики ударных волн. Сб. научных трудов. - Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН. - 1988. - Т. 2. - С. 194 - 195.
4. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Хорев И.Е. Особенности разрушения пластины при внедрении в нее двух сходящихся частиц // Четвертое Всес. совещание по детонации. Доклады. - Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН. - 1988. - Т.2. - С. 160 - 165.
5. Хорев И.Е., Горельский В.А., Зелепугин С.А. Исследование релаксационных эффектов в пластине при синхронном контактировании с ней двух частиц // Прикл. механика. - 1989. - № 6. - С. 42 - 48.
6. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Хорев И.Е. Исследование влияния температурных эффектов при ударноволновом нагружении твердых тел // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Материалы IX Всес. симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка: Изд-во ОИХФ АН СССР, 1989. С. 82-84, 159-161.
7. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Хорев И.Е. // М.: Изд-во "Машиностроение". Научно-технический сборник. - 1990. - N 8. - С. 40 - 45.
8. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Численное исследование механических и тепловых эффектов при импульсном воздействии на пластину из фторполимера // I Всес. совещание "Диэлектрические материалы в экстремальных условиях". Доклады, т. 2. - Суздаль, 1990. - С. 50 - 57.
9. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Реологические и тепловые эффекты при высокоэнергетическом импульсном воздействии на пластину из фторполимера // Реофизика и теплофизика неравновесных систем. Матер.

Межд. школы-семинара. Ч.2. Кинетические процессы в конденсированных средах. Минск: Изд-во ИТМО АН БССР, 1991. - С. 110 - 113.
10. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Математическое моделирование импульсных механических и тепловых процессов во фторполимерной пластине при высокоскоростном ударе // Электрофизические свойства диэлектриков при воздействии электромагнитных и акустических полей. Материалы расширенного заседания Научного совета АН СССР. - Иваново, 1991. - С. 24 - 28.
11. Зелепугин С.А. Численное исследование деформирования и разрушения пластин при несимметричном нагружении // Механика деформируемого твердого тела. - Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1992. - С. 65 - 70.
12. Вишняков С.Н., Горельский В.А., Зелепугин С.А. Численное моделирование динамического контактирования цилиндрических тел с жесткой стенкой с учетом тепловых эффектов // Механика деформируемого твердого тела. - Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1992. - С. 58 - 64.
13. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Сидоров В.Н. Численное исследование трехмерной задачи взаимодействия с высокопрочной преградой профилированного ударника с наполнителем // Пробл. прочности. - 1992. - № 1. - С. 47 - 50.
14. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Численное моделирование компактирования порошков при осесимметричном ударе // Порошковая металлургия. - 1992. - № 4. - С. 11 - 16.
15. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Влияние тепловых эффектов на процесс высокоскоростного пробивания пластины из фторполимера // Инженерно-физический журнал. - 1992. - Т. 62, № 4. - С. 564 - 568.
16. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Математическое моделирование развития трещин в керамике при контактном нагружении // Физико - химическая механика материалов. - 1992. - № 5. - С. 90 - 91.
17. Хорев И.Е., Горельский В.А., Зелепугин С.А. Разрушение и релаксационные эффекты в пластинах при синхронном контактировании с ними двух тел // Пробл. прочности. - 1992. - № 7. - С. 51 - 55.
18. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Сидоров В.Н. Численное исследование трехмерной задачи высокоскоростного взаимодействия цилиндров с недеформируемой преградой с учетом разрушения и температурных эффектов // Прикл. механика. - 1994. - Т. 30, № 3. - С. 35 - 40.
19. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф. Исследование пробивания преград при несимметричном высокоскоростном ударе с учетом разрушения и тепловых эффектов // Известия РАН. МТТ. - 1994. - № 5. - С. 121 - 130.

20. Gorelski V.A., Zelepugin S.A. Mathematical modelling of dynamic fracture of the brittle materials // SPM'94. International Conference. Structure and Properties of the Brittle and Quaziplastic Materials, June 14 - 16, 1994, Riga, Latvia. Proceedings. - Riga, 1994. - P. 76 - 80.
21. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Применение метода конечных элементов для исследования ортогонального резания металлов инструментом из СТМ с учетом разрушения и температурных эффектов // Сверхтвердые материалы. - 1995. - № 5. - С. 33 - 38.
22. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Математическое моделирование разрушения керамических преград при осесимметричном высокоскоростном ударе // Проблемы прочности. - 1995. - № 5-6. - С. 87-94.
23. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Смолин А.Ю. Исследование влияния дискретизации при расчете методом конечных элементов трехмерных задач высокоскоростного удара // Журнал вычислительной математики и математической физики. - 1997. - Т. 37, № 6. - С. 742 - 750.
24. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Вихревые структуры в керамике при высокоскоростном ударе // Письма в Журнал технической физики. - 1997. - Т. 23, № 24. - С. 86 - 90.
25. Горельский В.А., Зелепугин С.А. Расчет ударно-волнового компактирования керамического порошка в цилиндрической ампуле // Известия РАН. МТТ, 1998, № 6, с. 82-89.
26. Хорев И.Е., Зелепугин С.А., Коняев А.А., Сидоров В.Н., Фортов В.Е. Разрушение преград группой высокоскоростных тел // Доклады РАН. - 1999. - Т. 369, № 4. - С. 481 - 485.
27. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Сидоров В.Н. Численный анализ соударения разноплотных тел при ударе под углом // Известия РАН. МТТ. - 1999. - № 3. - С. 45 - 54.
28. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф. Экспериментальное и численное исследование разрушения керамики при высокоскоростном ударе // Хим. физика. - 1999. - Т. 18, № 11. - С. 104 - 107.
29. Зелепугин С.А., Сидоров В.Н. Трехмерный расчет формирования зон разрушений в пластине при синхронном ударе трех частиц // Математическое моделирование процессов в синергетических системах: Сборник статей. - Улан-Удэ - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. - С. 181 - 183.
30. Видищева Е.Б., Семенцова М.А., Зелепугин С.А., Платова Т.М. Численное исследование развития повреждений в керамике при двукратном ударном нагружении // Математическое моделирование процессов в синергетических системах: Сборник статей. Улан-Удэ - Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999, с. 171-173.

31. Зелепугин С.А., Никуличев В.Б. Численное моделирование взаимодействия серы и алюминия при ударно-волновом нагружении // ФГВ. - 2000. - Т. 36, № 6. - С. 186 - 191.
32. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Радченко А.В. Численное исследование задач ударно-волнового взаимодействия твердых тел при наличии нескольких контактных границ // Хим. физика. - 2000. - Т. 19, № 1. - С. 54 - 57.
33. Видищева Е.Б., Зелепугин С.А., Платова Т.М. Тепловые эффекты в трехмерных расчетах задач соударения // Вычислительные технологии. - 2001. - Т. 6, ч. 2. - С. 102 - 107.
34. Зелепугин С.А. Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия тел с учетом модели разрушения эрозионного типа // Вычислительные технологии. - 2001. - Т. 6, ч. 2. - С. 163 - 167.
35. Zelepugin S.A., Sidorov V.N., Khorev I.E. Experimental and numerical investigation of failure of targets by a group of high velocity bodies // Proceedings of the 4th International Symposium “Strength and Fracture of Materials and Structural Members under Impulse Loading” (IMPULSE-2001), May 22 - 24, 2001, Kiev, Ukraine. - Kiev: Ins. for Problems of Strength of the National Ac. Sc. of Ukraine, 2001. - P. 73 - 75.
36. Зелепугин С.А., Семенцова М.А., Платова Т.М. Численное моделирование разрушения керамических преград при двукратном ударно-волновом нагружении // Труды Межд. конф. III Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», Саров, 26 февраля - 2 марта 2001 г. - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. - С. 222 - 224.
37. Зелепугин С.А., Хорев И.Е. Влияние формы ударника на проникание в преграду и разрушение // Хим. физика. - 2002. - Т. 21, № 9. - С. 29 - 34.
38. Zelepugin S.A., Sidorov V.N., Vidischeva E.B. Erosion failure model for 3D simulation of perforation of targets by a group of high-velocity bodies // Int. Workshop “New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter”, Edinburgh, Scotland, 19 - 24 May, 2002. - Moscow: High Pressure Center, Inst. Chem. Phys. RAS, 2002. - P. 132 - 134.
39. Хорев И.Е., Якушев В.К., Зелепугин С.А., Сидоров В.Н., Фортов В.Е. Метание и соударение группы высокоскоростных тел // Доклады РАН. - 2003. - Т. 389, № 2. - С. 197-202.
40. Зелепугин С.А., Сидоров В.Н., Хорев И.Е. Экспериментальное и численное исследование разрушения преград группой высокоскоростных тел // Проблемы прочности. - 2003. - № 2. - С. 92 - 101.

Отпечатано на участке оперативной полиграфии
Редакционно-издательского отдела ТГУ
Лицензия ПД № 00208 от 20 декабря 1999 г.

Заказ № _____ «____» _____ 2003 г. Тираж 100 экз.