

УДК 539.3

А.С. Зелепугин, С.А. Зелепугин, В.А. Скрипняк

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
МНОГОСЛОЙНОЙ ПРЕГРАДЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
УДЛИНЕННЫМ УДАРНИКОМ ПО НОРМАЛИ И ПОД УГЛОМ¹**

Численно в рамках упругопластической модели среды исследована задача взаимодействия удлинённого ударника с двуслойной преградой, состоящей из верхнего стального слоя и реакционноспособного рабочего слоя, при ударе по нормали и под углом. Получены формулы взаимного пересчета характерного размера и начальной скорости ударника при ударе под углом и по нормали.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, численное моделирование, метод конечных элементов.

Рассматривается задача о взаимодействии по нормали и под углом удлинённого ударника с двуслойной преградой, состоящей из верхнего стального слоя и слоя реагирующего материала. Решение задачи позволяет теоретически обосновать условия высокоскоростного взаимодействия ударника с преградой в модельных экспериментах по определению критериев инициирования химически реагирующих материалов и смесей. Исследовано влияние геометрических параметров ударников на формирование полей напряжений и деформаций в слоистых преградах при ударе по нормали и под углом. Предложены приближенные формулы пересчета геометрических параметров ударника и его начальной скорости, позволяющие получить подобие полей напряжений и деформаций в слоистой преграде при ударе по нормали и под углом.

Постановка задачи

Для численного моделирования процессов высокоскоростного ударного нагружения используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся наличием микрополостей (пор, трещин). Общий объем среды W составляют неповрежденная часть среды, занимающая объем W_s и характеризующаяся плотностью ρ_s , и микрополости, занимающие объем W_f , в которых плотность полагается равной нулю. Средняя плотность повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением $\rho = \rho_s (W_c / W)$. 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 сжимаемой среды с учетом эволюции микроповреждений и твердофазных химических превращений, состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии, кинетического уравнения химических реакций и изменения удельного объема пор [1 – 7]:

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-08-00516), РФФИ и администрации Томской области (проект 09-08-99059), Минобрнауки РФ в рамках АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проекты 2.1.1/5993, 2.1.2/6809).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\rho dv_i}{dt} = \sigma_{ij,j}; \quad (2)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} + \frac{dQ_r}{dt}, \quad \frac{dQ_r}{dt} = \Delta H \frac{d\eta}{dt}; \quad (3)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } \eta = 1 \text{ или } (T < T_\eta \text{ и } P < P_\eta), \\ f(P_\eta), & \text{если } \eta < 1 \text{ и } (T \geq T_\eta \text{ или } P \geq P_\eta); \end{cases} \quad (4)$$

$$f(P_\eta) = \begin{cases} K_0, & \text{если } P < P_\eta, \\ K_p K_0, & \text{если } P \geq P_\eta; \end{cases}$$

$$\frac{dV_f}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |P_s| \leq P^* \text{ или } (P_s > P^* \text{ и } V_f = 0), \\ -\operatorname{sign}(P_s) K_f (|P_s| - P^*)(V_2 + V_f), & \\ \text{если } P_s < -P^* \text{ или } (P_s > P^* \text{ и } V_f > 0), \end{cases} \quad (5)$$

где ρ – плотность, v – вектор скорости, v_i – компоненты вектора скорости, E – удельная внутренняя энергия, $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$ – компоненты тензора напряжений, ϵ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций, Q_r – удельное тепловыделение химической реакции, ΔH – энтальпия химической реакции, η – степень превращения вещества, T – температура, P_s – давление в сплошной компоненте вещества, $P = P_s (\rho / \rho_s)$ – среднее давление, $P^* = P_k V_1 / (V_f + V_1)$, T_η , P_η , K_p , K_0 , K_f , P_k , V_1 , V_2 – константы материала.

При моделировании твердофазных химических реакций в условиях ударно-волнового нагружения используются кинетические соотношения (4) нулевого порядка, характеризующиеся постоянной скоростью протекания химических превращений. Константа реакционной способности смеси K_0 является структурно-зависимой величиной и определяется прежде всего размерами частиц компонентов, причем для смеси с большей дисперсностью значение K_0 больше [4]. Моделирование разрушений проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа, определяющей рост микротрещин, непрерывно изменяющих свойства материала и вызывающих релаксацию напряжений [8].

Давление в неповрежденном веществе считается функцией удельного объема и удельной внутренней энергии и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми – Грюнайзена, в котором коэффициенты подбираются на основе констант ударной адиабаты Гюгонно.

Определяющие соотношения связывают компоненты девиатора напряжений и тензора скоростей деформаций, при этом используется производная Яуманна. Для описания пластического течения применяется условие Мизеса. Учтены зависимости прочностных характеристик среды (модуля сдвига и динамического предела текучести) от температуры и уровня поврежденности материала [1, 8].

В качестве критерия эрозийного разрушения материала, имеющего место в области интенсивного взаимодействия и деформирования контактирующих тел, используется критическое значение удельной энергии сдвиговых деформаций. Текущее значение этой энергии вычисляется с помощью формулы

$$\rho \frac{dE_{sh}}{dt} = S_{ij} \epsilon_{ij}. \quad (6)$$

Критическая величина удельной энергии сдвиговых деформаций зависит от условий взаимодействия и задается функцией начальной скорости удара:

$$E_{sh}^c = a_{sh} + b_{sh} v_0, \quad (7)$$

где a_{sh} , b_{sh} – константы материала. Когда $E_{sh} > E_{sh}^c$ в расчетной ячейке, 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. Если при этом масса какого-либо расчетного узла становится нулевой, то данный узел считается разрушенным и также удаляется из дальнейшего расчета.

Результаты расчетов

В двумерной постановке моделировалось взаимодействие ударника из сплава ВНЖ, с размерами 24 x 160 мм с двуслойной преградой длиной 250 мм и общей толщиной 80 мм. Первый слой преграды представлял собой пластину толщиной 20 мм из стали, второй слой – реагирующий материал, в качестве которого рассмотрена смесь алюминия с серой. Толщина данного слоя составила 60 мм. Начальная скорость удара 1600 м/с, угол подхода ударника был 65° от нормали к преграде. Между стержнем и преградой, а также между слоями преграды реализованы условия скольжения. Характеристики ВНЖ, стали и реакционноспособной смеси приведены в [4, 7, 9].

Расчеты показывают, что ударная волна в рассматриваемом случае входит в рабочий слой преграды примерно к 13 мкс после начала соударения. При этом ударник продолжает увеличивать область контактирования с верхним слоем преграды. В результате этого центр ударной волны смещается по ходу движения ударника, а протяженность зоны, охваченной ударно-волновыми процессами, растет. Также на процесс оказывают влияние волны разрежения и затухание ударных волн по мере распространения по материалу рабочего слоя преграды.

Наиболее характерным моментом в распространении ударной волны по рабочему слою преграды можно считать момент времени 30 мкс. До этого момента времени в целом шел рост области входа ударной волны в рабочий слой преграды из-за роста области контакта ударника с верхним слоем преграды.

К моменту времени 30 мкс область контакта в целом стабилизировалась. В дальнейшем все большее влияние оказывают волны разрежения, ослабляющие ударную волну. Также имеет место тенденция перехода от ударно-волнового к деформационному механизму воздействия на рабочий слой преграды. Это воздействие осуществляется сначала верхним слоем преграды, деформирующимся и перемещающимся под действием внедряющегося ударника, а на последующих стадиях процесса – непосредственно самим ударником после прохождения им верхнего слоя преграды.

На рис. 1 для момента времени 30 мкс представлен фрагмент взаимодействующих тел и изолинии давления в рабочем слое материала. Линии уровней изолиний давления выбраны следующим образом: начальное значение давления составляло 0,01 ГПа, интервал между изолиниями – 0,25 ГПа.

Протяженность зоны контакта ударника с верхним слоем преграды в плоскости удара составляет в данный момент процесса 50 мм, линия контакта близка к отрезку прямой, угол наклона которого составил примерно 33° от горизонтали.

Максимальное значение давления составило 1,8 ГПа. На более ранних этапах процесса максимальное давление превышало 2 ГПа. В момент времени 30 мкс ширина зоны с уровнем давления $P = 0,26$ ГПа составила 86 мм, $P = 1$ ГПа – 58 мм. Эти значения были приняты в качестве ориентира.

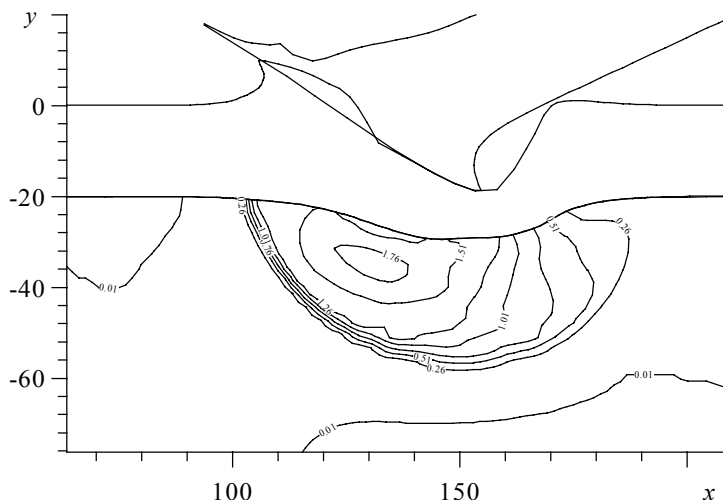


Рис. 1. Фрагмент взаимодействующих под углом 65° тел и изолинии давления в рабочем слое преграды в момент времени 30 мкс

Для сравнения была рассмотрена задача взаимодействия удлиненного ударника с двуслойной преградой, состоящей из верхнего стального слоя и рабочего слоя, при ударе по нормали. Материалы преграды и ударника идентичны предыдущему варианту. При идентичной длине ударника его диаметр варьировался с целью получить ударно-волновую картину в преграде, близкую к наблюдаемой при ударе под углом. Начальная скорость удара также варьировалась.

Первоначально был проведен расчет взаимодействия ударника с двуслойной преградой и начальной скоростью 676,2 м/с. Данная величина начальной скорости соответствует нормальной компоненте скорости при ударе под углом, равной $v_0 \cos(\alpha)$, где $v_0 = 1600$ м/с, $\alpha = 65^\circ$. Диаметр ударника был выбран равным ширине ударника в случае расчета удара под углом и составил 24 мм.

При ударе по нормали ударно-волновой процесс развивается отлично от случая удара под углом. Ударная волна проходит в рабочий слой преграды примерно к 6 мкс, действует примерно до 10 мкс, затем затухает в основном из-за волн разрежения. В момент времени 30 мкс общая протяженность области взаимодействия ударника с верхним слоем преграды заметно больше, чем при ударе под углом, но при ударе по нормали к этому периоду процесса ударно-волновые явления в рабочем слое преграды уже затухли.

На рис. 2 представлен фрагмент взаимодействующих тел и изолинии давления в рабочем слое преграды в момент времени 7 мкс. В данный момент времени максимальное давление равно 2,1 ГПа, размеры зон $P = 1$ ГПа – 31 мм, $P = 0,26$ ГПа – 38 мм. В момент времени 6 мкс $P_{\max} = 3$ ГПа, ширина зоны $P = 2$ ГПа составляет 13,5 мм, $P = 0,26$ ГПа – 20 мм. В момент времени 9 мкс максимальное давление равно 1,14 ГПа.

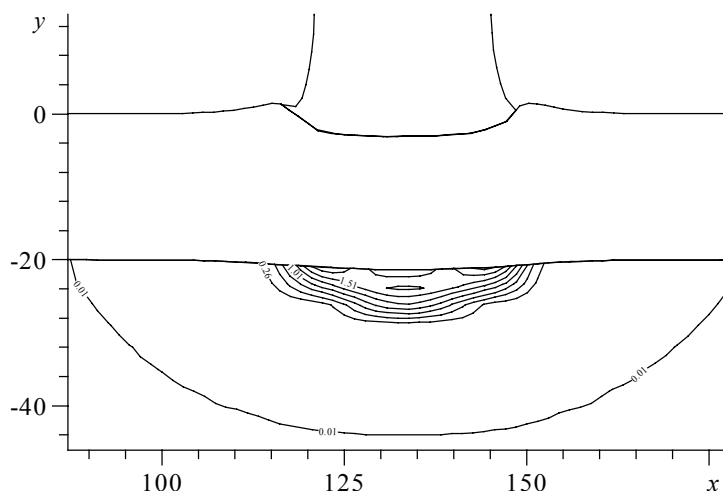
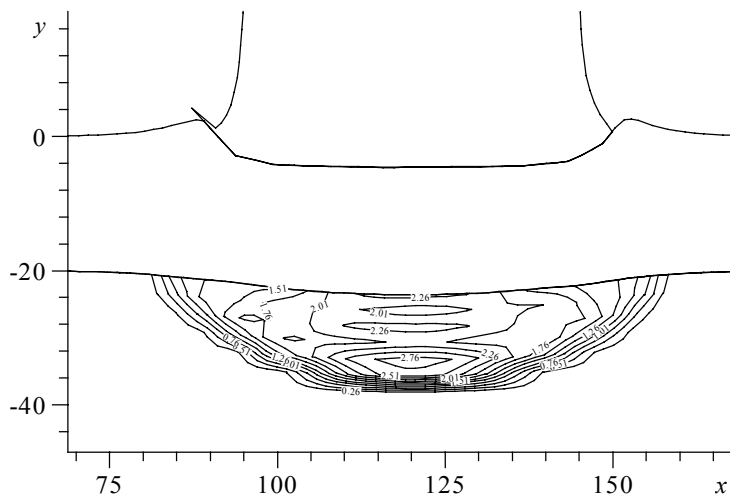


Рис. 2. Фрагмент взаимодействующих по нормали тел и изолинии давления в рабочем слое преграды в момент времени 7 мкс

Такие размеры ударно-волновой области в рабочем слое преграды существенно отличаются от случая удара под углом 65° .

С целью увеличения размера ударно-волновой области был проведен расчет взаимодействия по нормали ударника диаметром 50 мм вместо 24 мм, с начальной скоростью 676,2 м/с. Величина 50 мм близка к значению $d_0/\cos(\alpha) = 56,8$ мм, где $d_0 = 24$ мм, $\alpha = 65^\circ$. Остальные параметры преграды и ударника соответствуют предыдущей задаче. Фрагмент взаимодействующих тел и изолинии давления в рабочем слое материала в момент времени 10 мкс представлен на рис. 3.

Результаты расчетов показывают, что с увеличением ширины ударника в данном случае возрастает протяженность ударно-волновой области в рабочем слое



преграды, время действия ударных волн до затухания, а также максимальные давления. В момент времени 7 мкс $P_{\max} = 4,64$ ГПа, ширина зоны $P = 1$ ГПа составляет 58 мм, $P = 0,26$ ГПа – 65 мм. В момент времени 10 мкс $P_{\max} = 2,87$ ГПа, ширина зоны $P = 1$ ГПа составляет 68 мм, $P = 0,26$ ГПа – 77,5 мм. Размеры указанных зон хорошо коррелируют со случаем удара под углом 65° , однако максимальные давления при ударе по нормали в данном случае существенно превосходят значения, имеющие место при ударе под углом.

С целью достижения соответствия амплитуды давлений в рабочем слое был проведен расчет взаимодействия по нормали ударника диаметром 50 мм, начальная скорость которого была задана равной 570 м/с. Остальные параметры задачи идентичны предыдущей. На рис. 4 для момента времени 10 мкс представлен фрагмент взаимодействующих тел и изолинии давления в рабочем слое материала. В данный момент времени $P_{\max} = 2,02$ ГПа, ширина зоны $P = 1$ ГПа составляет 57,5 мм, $P = 0,26$ ГПа – 72,5 мм. Приведенные значения близки к случаю удара под углом 65° . Полученные результаты позволили получить приближенные соотношения характерных размеров и начальной скорости ударников при ударе под углом и по нормали для достижения соответствия полей напряжений и деформаций.

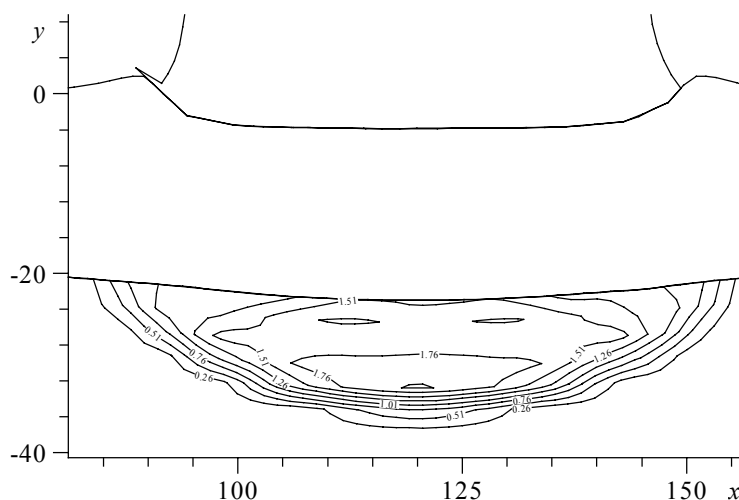


Рис. 4. Фрагмент тел, взаимодействующих по нормали, и изолинии давления в рабочем слое преграды в момент времени 10 мкс. Диаметр ударника 50 мм, начальная скорость 570 м/с

Для размера ударника: $d_n = k_d d_a / \cos(\alpha)$, где $k_d = 0,88$, d_n – диаметр ударника при ударе по нормали, d_a – диаметр ударника при ударе под углом α ; для начальной скорости: $v_n = k_v v_a \cos(\alpha)$, где $k_v = 0,84$, v_n – начальная скорость ударника при ударе по нормали, v_a – начальная скорость ударника при ударе под углом α . Так как данные коэффициенты близки, то можно ввести один общий коэффициент, равный 0,85. Окончательно приближенные зависимости имеют вид

$$d_n = 0,85 d_a / \cos(\alpha), \quad v_n = 0,85 v_a \cos(\alpha)$$

при переходе от удара под углом к удару по нормали, и

$$d_a = 1,18 d_n \cos(\alpha), \quad v_a = 1,18 v_n / \cos(\alpha)$$

при обратном переходе.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что полной аналогии деформирования и условий ударно-волнового нагружения преграды при ударе по нормали и под углом не наблюдается. Вместе с тем, отмечено некоторое приближенное соответствие ряда параметров процесса.

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зелепугин С.А., Коняев А.А., Сидоров В.Н. и др. Экспериментально-теоретическое исследование соударения группы частиц с элементами защиты космических аппаратов // Космические исследования. 2008. Т. 46. № 6. С. 559 – 570.
2. Зелепугин С.А., Зелепугин А.С. Моделирование разрушения преград при высокоскоростном ударе группы тел // Химическая физика. 2008. Т. 27. № 3. С. 71 – 76.
3. Зелепугин А.С., Зелепугин С.А., Скрипняк В.А. Механизм роста глубины внедрения при ударе группы малодеформируемых сферических частиц // Изв. вузов. Физика. 2009. № 10. С. 38 – 41.
4. Иванова О.В., Зелепугин С.А. Условие совместного деформирования компонентов смеси при ударно-волновом компактировании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2009. № 1(5). С. 54 – 61.
5. Шипачев А.Н., Зелепугин С.А. Численное моделирование процессов высокоскоростного ортогонального резания металлов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2009. № 2(6). С. 109 – 115.
6. Шипачев А.Н., Ильина Е.В., Зелепугин С.А. Деформирование титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 4. С. 20 – 24.
7. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. Разрушение металла – интерметаллидного многослойного композита при высокоскоростном ударе // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15. № 3. С. 369 – 382.
8. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Исследования механических свойств материалов при ударно-волновом нагружении // Известия РАН. МТТ. 1999. № 5. С. 173 – 188.
9. Герасимов А.В., Михайлов В.Н., Сурков В.Г. Ударное нагружение комбинированных преград // Механика композиционных материалов и конструкций. 2006. Т. 12. № 2. С. 237 – 255.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

ЗЕЛЕПУГИН Алексей Сергеевич – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета. E-mail: a-zel@sibmail.com

ЗЕЛЕПУГИН Сергей Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры механики деформируемого твердого тела физико-технического факультета Томского государственного университета, ведущий научный сотрудник отдела структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН. E-mail: szel@dsmtsc.ru, szel@yandex.ru

СКРИПНЯК Владимир Альбертович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой механики деформируемого твердого тела Томского государственного университета. E-mail: skrp@ftf.tsu.ru

Статья принята в печать 06.05.2010 г.