

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЛ С УЧЕТОМ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ЭРОЗИОННОГО ТИПА

С. А. ЗЕЛЕПУГИН

*Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН  
Томск, Россия*

The problem of high-velocity interaction of a group of several identical cylindrical bodies with a target is considered. Numerical simulation of damage accumulation in a sample is performed with an application of kinetic model of fracture. As a criterion of eroding failure of material having place in the field of intensive interaction and deformation of contacting bodies, the critical value of specific energy of shear deformations is used.

### Введение

Одной из сложнейших задач механики сплошной среды является исследование процессов взаимодействия нескольких тел с препятствием в условиях высокоскоростного ударного нагружения. Как в экспериментальном, так и в теоретическом плане проблемам группового удара до сих пор уделялось крайне мало внимания в силу больших материальных затрат на реализацию. В [1, 2] численно исследовались особенности процессов соударения двух тел с пластиной в двумерной плоско-деформационной постановке и было показано взаимное влияние высокоскоростных частиц на конечный результат взаимодействия. Однако численное моделирование в плоской постановке особенно заключительных стадий деформирования и разрушения может давать результаты, качественно отличающиеся от наблюдаемых трехмерных экспериментов [3]. В данной работе процессы высокоскоростного взаимодействия нескольких компактных тел с преградой исследуются численно в трехмерной постановке. Рассмотрено симметричное и несимметричное, синхронное и разновременное взаимодействие двух, трех и четырех частиц с преградой конечной толщины с начальной скоростью удара порядка 3000 м/с. Для описания разрушения материала тел в области значительных пластических деформаций применялась модель разрушения эрозионного типа [4, 5].

### Постановка задачи и описание результатов

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  $\rho_s$  и микрополости, занимающие объем  $W_f$ , в которых плотность полагается равной нулю. Средняя плотность повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением  $\rho = \rho_s(W_s/W)$ . Степень поврежденности среды характеризуется удельным объемом пор  $V_f = W_f/(W\rho)$ .

Система уравнений, описывающая нестационарные адиабатические движения сжимаемой среды с учетом эволюции микроповреждений состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии, изменения удельного объема пор:

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

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

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

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

где  $\rho$  — плотность,  $V$  — вектор скорости,  $V_i$  — компоненты вектора скорости,  $E$  — удельная внутренняя энергия,  $\sigma_{ij} = -(P+Q)\delta_{ij} + S_{ij}$  — компоненты тензора напряжений,  $\varepsilon_{ij}$  — компоненты тензора скоростей деформаций,  $P_s$  — давление в сплошной компоненте вещества,  $P = P_s(\rho/\rho_s)$  — среднее давление,  $Q$  — искусственная вязкость,  $P^* = P_k V_1 / (V_f + V_1)$ ,  $K_f, P_k, V_1, V_2$  — константы материала.

Давление в неповрежденном веществе является функцией удельного объема, внутренней энергии и удельного объема трещин и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена [6]:

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

где  $\mu = V_0/(V - V_f) - 1$ ,  $\gamma_0$  — коэффициент Грюнайзена,  $V_0$  и  $V$  — начальный и текущий удельные объемы,  $a$  и  $b$  — константы ударной адиабаты Гюгонио, описываемой линейным соотношением  $u_s = a + b u_p$ , где  $u_s$  — скорость ударной волны,  $u_p$  — массовая скорость вещества за фронтом ударной волны.

В соответствии с подходом [7], примененным для расчета как компактирования, так и порообразования в условиях ударно-волнового нагружения, в настоящей работе использованы представления, согласно которым на изменение пористости влияет только шаровая компонента напряжений или давление, а компоненты девиатора напряжений ограничены независимой девиаторной функцией текучести:

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

где  $dS_{ij}^0/dt$  — производная по Яуманну. Параметр  $\lambda$  тождественно равен нулю при упругой деформации, а при наличии пластической — определяется с помощью условия текучести Мизеса:

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

Здесь  $G$  — модуль сдвига,  $\sigma$  — динамический предел текучести, которые зависели от давления, текущего уровня микроповреждений и температуры согласно соотношениям, приведенным в [6, 8, 9]. Для вычисления температуры используются соотношения, наиболее полно приведенные в [9].

В качестве критерия эрозионного разрушения материала, имеющего место в области интенсивного взаимодействия и деформирования контактирующих тел, используется критическое значение удельной энергии сдвиговых деформаций [5]. Текущее значение этой энергии вычисляется с помощью формулы

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

индексы  $i, j$  принимают значения 1, 2, 3. Критическая величина удельной энергии сдвиговых деформаций зависит от условий взаимодействия и является функцией начальной скорости удара

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

где  $a_{sh}, b_{sh}$  — константы материала. Когда

$$E_{sh} > E_{sh}^c$$

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

На рис. 1 приведены хронограммы процесса внедрения группы из четырех идентичных компактных

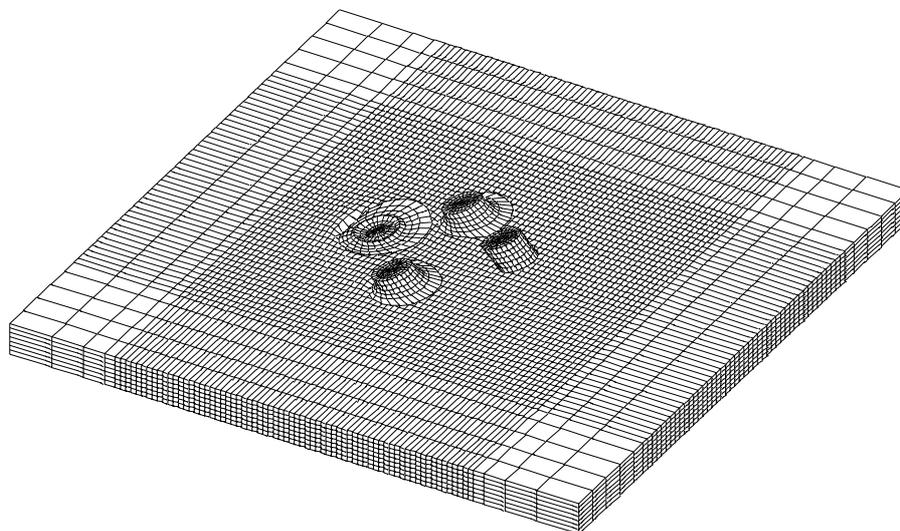
цилиндрических ударников в преграду в моменты времени 3 и 10 мкс после начала взаимодействия. Диаметр и высота ударников составили 6 мм, толщина преграды 8 мм. Начальная скорость каждого ударника была равна 2873 м/с. Начальные расстояния между их центрами были выбраны следующим образом: между двумя крайними ударниками это расстояние составило 33 мм, два других были расположены симметрично на расстоянии 22.8 мм от одного ударника (на рис. 1 крайнего слева) и 25 мм от второго. В начальный момент времени торцевые поверхности всех четырех ударников находились в одной плоскости, отклоненной от лицевой поверхности преграды на угол  $30^{\circ}$ , при этом вектора скоростей ударников совпадали с их осями симметрии и с нормалью к данной плоскости. Материал взаимодействующих тел - сталь, константы материала можно найти в [3]. На контактных поверхностях реализованы условия скольжения. Для численного решения задачи использовался модифицированный метод конечных элементов [10, 11].

Верхний фрагмент на рис. 1 иллюстрирует момент процесса, когда промежуточные два ударника только начали взаимодействовать с преградой, в то время как последний, крайний справа, ударник еще не подошел к преграде, а первый внедряется в преграду, испытывая значительные пластические деформации, моделируемые в том числе с применением концепции разрушения эрозионного типа. Нижний фрагмент рис. 1 иллюстрирует этап устойчивого внедрения остатков ударников в преграду.

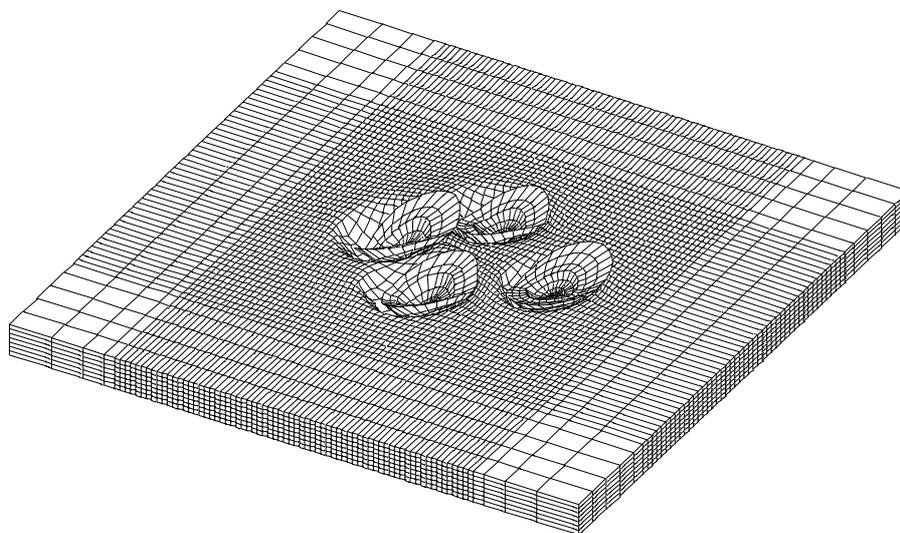
Расчеты показывают, что при заданных условиях взаимодействия наблюдается взаимное влияние процессов и образование объединенной зоны деформирования и разрушения в преграде с экстремумами, соответствующими каждому ударнику. Представленные на рис. 2 распределения изолиний (в каждом случае даны половинные сечения поверхности преграды из-за наличия плоскости симметрии), иллюстрируют слияние зон повреждений и деформирования первого и промежуточных ударников. Зона, обусловленная воздействием последнего ударника, несколько отстоит от объединенной области вследствие более позднего начала соударения и большего начального расстояния между ударниками. Кроме того, наблюдается дополнительный очаг повреждений между последним и средними ударниками, обусловленный их взаимным влиянием.

## Список литературы

- [1] ХОРОВ И. Е., ГОРЕЛЬСКИЙ В. А., ЗЕЛЕПУГИН С. А. Исследование релаксационных эффектов в пластине при синхронном контактировании с ней двух частиц. *Прикладная механика*, № 6, 1989, 42-48.
- [2] ХОРОВ И. Е., ГОРЕЛЬСКИЙ В. А., ЗЕЛЕПУГИН С. А. Разрушение и релаксационные эффекты в пластинах при синхронном контактировании с ними двух тел. *Проблемы прочности*, № 7, 1992, 51-55.
- [3] ГОРЕЛЬСКИЙ В. А., ЗЕЛЕПУГИН С. А., ТОЛКАЧЕВ В. Ф. Исследование пробивания преград при несимметричном высокоскоростном ударе с учетом разрушения и тепловых эффектов. *Известия АН. МТТ*, № 5, 1994, 121-130.
- [4] 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, 181-183.
- [5] ХОРОВ И. Е., ЗЕЛЕПУГИН С. А., КОНЯЕВ А. А., СИДОРОВ В. Н., ФОРТОВ В. Е. Разрушение преград группой высокоскоростных тел. *Доклады АН*, **369**, № 4, 1999, 481-485.
- [6] GUST W. H. High impact deformation of metal cylinders at elevated temperatures. *J. Appl. Phys.*, **53**, № 5, 1982, 3566-3575.
- [7] ХЕРРМАН В. Определяющие уравнения уплотняющихся пористых материалов. В кн. *"Проблемы теории пластичности"*, М.: Мир, 1976, 178-216.
- [8] КАНЕЛЬ Г. И., РАЗОРЕНОВ С. В., УТКИН А. В., ФОРТОВ В. Е. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах*. М.: "Янус-К", 1996.
- [9] ЗЕЛЕПУГИН С. А., НИКУЛИЧЕВ В. Б. Численное моделирование взаимодействия серы и алюминия при ударно-волновом нагружении. *ФГВ*, **36**, № 6, 2000, 186-191.
- [10] JOHNSON G. R. High velocity impact calculations in three dimensions. *J. Appl. Mech.*, **44**, № 1, 1977, 95-100.
- [11] 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*, **37**, № 6, 1997, 742-750.



$t = 3 \text{ мкс}$



$t = 10 \text{ мкс}$

Рис. 1. Конфигурации взаимодействующих группы из четырех тел и преграды в различные моменты времени процесса несимметричного соударения.

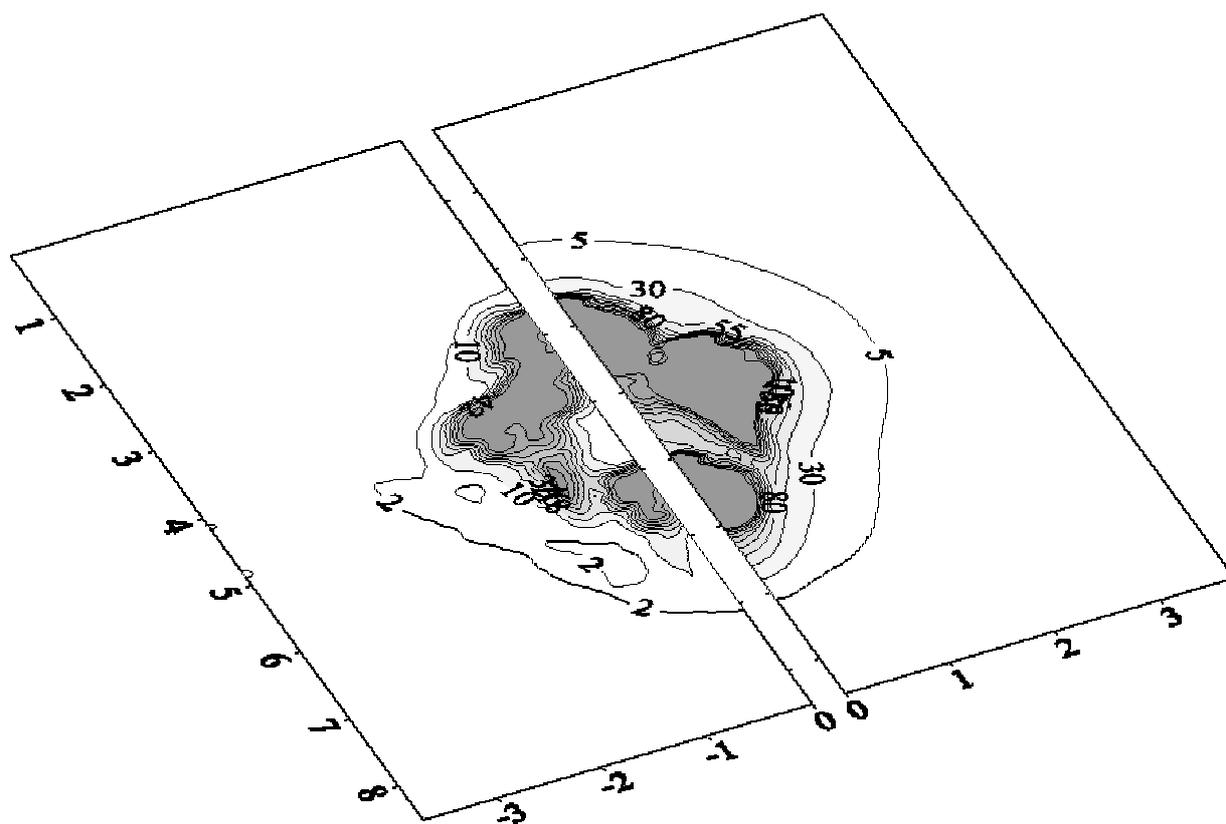


Рис. 2. Изолинии удельного объема микропор (слева,  $\Delta = 8 \text{ см}^3/\text{кг}$ ) и удельной энергии сдвиговых деформаций (справа,  $\Delta = 25 \text{ кДж/кг}$ ) на лицевой поверхности преграды в 17 мкс.