

## Экспериментальное и численное исследование разрушения преград группой высокоскоростных тел\*

С. А. Зелепугин, В. Н. Сидоров, И. Е. Хорев

Отдел структурной макрокинетики Томского научного центра СО РАН, Томск, Россия

*Экспериментально и численно в трехмерной постановке исследуются процессы высокоскоростного взаимодействия нескольких компактных тел с преградой конечной толщины. В экспериментах количество частиц в однородном потоке изменялось от двух до семи при варьировании плотности потока (расстояния между частицами). В расчетах моделировалось соударение четырех частиц с преградой при “фронтальном” и несимметричном эшелонированном ударе. Приведены полученные численно конфигурации тел и распределения удельного объема микроповреждений в преграде, экспериментальные данные по изменению площади и массы тыльных откольных элементов. Исследованы особенности деформирования и разрушения преград в зависимости от степени взаимовлияния частиц.*

**Ключевые слова:** компактные тела, преграда, частицы, плотность потока, несимметричное эшелонирование.

Задача о взаимодействии группы быстролетающих тел с преградами и конструкциями возникает при решении проблем защиты космических аппаратов в ближнем космосе от техногенных объектов, которые в результате многократных столкновений лавинообразно превращаются в потоки осколков различной плотности, интенсивности и эшелонированности. Данная задача остается нерешенной также при изучении процесса пробития крупным метеороидом или металлическим техногенным осколком системы разнесенных преград, имитирующих защитную конструкцию космических аппаратов, станций и модулей.

В теоретическом и особенно в экспериментальном плане проблемам группового удара частиц по мишени уделялось недостаточно внимания ввиду трудности обеспечения регулируемого и устойчивого метания группы тел с заранее заданной плотностью в потоке и их эшелонированностью, а также сложностью численного моделирования этих процессов. Ранее [1, 2] численно исследовались особенности процесса соударения двух частиц с плоской преградой в двухмерной плоскодеформационной постановке. При этом обнаружено взаимное влияние внедряющихся частиц при определенном расстоянии между ними на конечный результат взаимодействия. В работе [3] выполнено предварительное комплексное исследование процесса высокоскоростного разрушения мишени группой тел из четырех частиц. При этом численное моделирование процесса проникания группы частиц осуществлялось в полной трехмерной постановке при “фронтальном” (одновременный удар всех частиц по нормали к преграде) подходе к мишени группы осколков.

\* Доклад на IV Международном симпозиуме “Прочность и разрушение материалов и элементов конструкций при импульсном нагружении” (IMPULSE-2001).

Для исследования динамики процессов высокоскоростного деформирования и разрушения контактирующих тел, а также оценки их взаимного влияния при фронтальном и эшелонированном ударе группы тел проведено численное моделирование методом конечных элементов [4, 5]. При численных расчетах использовалась модель повреждаемой среды с микрополостями (поры, трещины) [6]. Общий объем среды  $W$  составляют: неповрежденная часть среды, занимающая объем  $W_c$  и характеризующаяся плотностью  $\rho_c$ , и микрополости, занимающие объем  $W_f$ , в которых плотность полагается равной нулю. Средняя плотность такой повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением  $\rho = \rho_c(W_c/W)$ . Степень поврежденности среды характеризуется удельным объемом пор  $V_f = W_f/(W\rho)$ .

Система уравнений, описывающая нестационарное поведение упруго-пластической среды в адиабатических условиях с учетом эволюции микроповреждений и влияния температурных эффектов для случая трех пространственных переменных, состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии, скорости изменения удельного объема пор [5, 7]:

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

$$\frac{\rho dv_i}{dt} = \sigma_{ij,j};$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij};$$

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

где  $\rho$  – плотность;  $v_i$  – компоненты вектора скорости  $v$ ;  $E$  – удельная внутренняя энергия;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\sigma_{ij} = -(P + Q)\delta_{ij} + S_{ij}$  – 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;  $P^* = P_k V_1/(V_f + V_1)$ ;  $V_1, V_2, P_k, K_f$  – экспериментально определяемые константы материала.

Для численного моделирования разрушения материала при высокоскоростном соударении применялась кинетическая модель разрушения активного типа [8], определяющая рост микроповреждений, которые непрерывно изменяют свойства материала, вызывая релаксацию напряжений. Давление в неповрежденном веществе, являясь функцией удельного объема, удельной

внутренней энергии и удельного объема микрповреждений, во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми–Грюнайзена [9]:

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

где  $\mu = V_0/(V - V_f) - 1$ ;  $\gamma_0$  – коэффициент Грюнайзена;  $V_0$  и  $V$  – начальный и текущий удельные объемы;  $a$  и  $b$  – константы адиабаты Гюгонно, описываемой линейным соотношением

$$u_s = a + bu_p$$

( $u_s$  – скорость ударной волны,  $u_p$  – массовая скорость вещества за фронтом ударной волны).

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. Параметр  $\lambda$  тождественно равен нулю при упругой деформации, при наличии пластической он определяется с помощью условия текучести Мизеса:

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

В приведенных выше формулах модуль сдвига  $G$  и динамический предел текучести  $\sigma$  определяются согласно соотношениям [9, 10]

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

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 K_T \left( 1 + \frac{cP}{(1 + \mu)^{1/3}} \right) \left( 1 - \frac{V_f}{V_4} \right), & \text{если } V_f \leq V_4; \\ 0, & \text{если } V_f > V_4; \end{cases}$$

$$K_T = \begin{cases} 1, & \text{если } T_0 \leq T \leq T_1; \\ \frac{T_m - T}{T_m - T_1}, & \text{если } T_1 < T < T_m; \\ 0, & \text{если } T \geq T_m, \end{cases}$$

где  $T_m$  – температура плавления вещества;  $c$ ,  $V_3$ ,  $V_4$ ,  $T_1$  – константы материала. Выбор функции  $K_T(T)$  осуществлялся с целью моделирования в расчетах атермического характера пластического деформирования и динамической прочности твердых тел при высоких скоростях деформирования ( $10^4 \text{ с}^{-1}$  и выше) [11]. Для вычисления температуры использовались соотношения [10]

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

Здесь  $c_p$  – удельная теплоемкость, возрастающая линейно с повышением температуры до температуры плавления вещества:

$$c_p = \begin{cases} c_p^0 + \frac{c_p^L - c_p^0}{T_m - T_0}(T - T_0), & \text{если } T_0 \leq T < T_m; \\ c_p^L, & \text{если } T \geq T_m; \end{cases}$$

$E_{0x}$  – холодная составляющая удельной внутренней энергии, определяемая выражением [9]

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

где  $\xi = 1 - \rho_0/\rho_c$ ;  $\Delta H_m$  – удельная теплота плавления;  $c_p^0$  и  $c_p^L$  – константы материала;  $E_0 = -T_0c_p^0$ ;  $E_1 = \gamma_0E_0$ ;  $E_2 = (a^2 + \gamma_0^2E_0)/2$ ;  $E_3 = (4ba^2 + \gamma_0^3E_0)/6$ ;  $E_4 = (-2\gamma_0ba^2 + 18a^2b^2 + \gamma_0^4E_0)/24$ ;  $T_0$  – начальная температура.

В качестве критерия эрозионного разрушения материала в области интенсивного взаимодействия и деформирования контактирующих тел используется критическое значение удельной энергии сдвиговых деформаций [3, 12]. Текущее значение этой энергии вычисляется с помощью формулы

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

где  $S_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты девиатора скоростей деформаций; индексы  $i, j$  принимают значения 1, 2, 3. Критическая величина удельной энергии сдвиговых деформаций, зависящая от условий взаимодействия тел, является функцией начальной скорости удара:

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

где  $a_{sh}, b_{sh}$  – константы материала. При  $E_{sh} > E_{sh}^0$  расчетная ячейка в области контактных границ считается разрушенной, а параметры соседних ячеек корректируются.

На первом этапе рассматривается задача фронтального соударения четырех идентичных компактных цилиндрических ударников массой 0,88 г, диаметром и высотой 5,24 мм по нормали с преградой толщиной 8 мм. Начальная скорость каждого ударника равна 2873 м/с. Начальное расстояние между их центрами выбиралось следующим образом: между двумя ударниками оно составило 33 мм, два других были расположены симметрично на расстоянии 22,8 мм от одного ударника и 25 мм от другого. Материал взаимодействующих тел – сталь, константы материала приведены ранее [7]. На контактных поверхностях реализовывались условия скольжения.

На рис. 1 представлена хронограмма процесса внедрения четырех ударников в преграду при фронтальном ударе на 1-й мкс после начала взаимодействия. Начальные расстояния между частицами таковы, что имеет место взаимное влияние процессов внедрения и образование объединенной зоны деформирования и разрушения в преграде с экстремумами, соответствующими каждому ударнику. Расчеты показали, что при этом энергия сдвиговых деформаций в преграде достигает высоких значений прежде всего в области от лицевой поверхности вплоть до срединных слоев, внося основной вклад в повышение температуры, оказывая заметное влияние на характер деформирования и разрушения соударяющихся тел и значительно ухудшая прочностные характеристики.

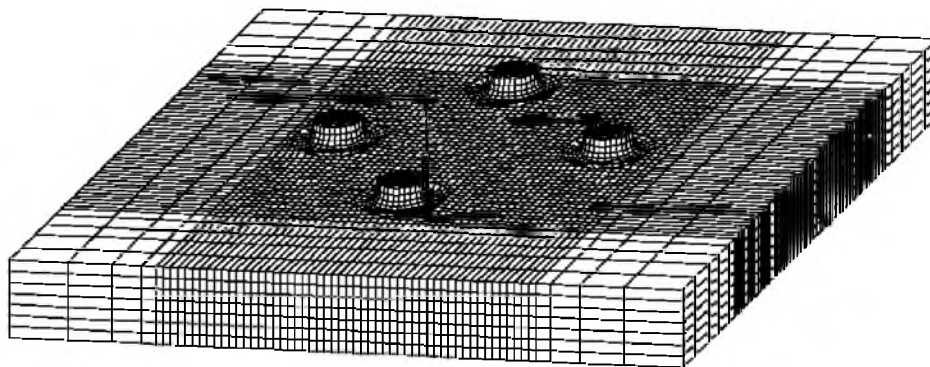


Рис. 1. Схема взаимодействия ударников при фронтальном групповом ударе по нормали.

В общем случае взаимодействие группы тел с преградой носит несимметричный (соударение под углом) эшелонированный (начало взаимодействия каждой частицы разнесено по времени) характер. Для численного исследования подобных процессов рассматривается соударение четырех идентичных цилиндрических ударников диаметром и высотой 6 мм по преграде толщиной 8 мм. Начальная скорость каждого ударника равна 2873 м/с. Начальное расстояние между их центрами выбиралось таким образом: между двумя ударниками оно 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. В начальный момент времени все ударники находились в плоскости, составляющей угол  $30^\circ$  с нормалью к лицевой поверхности преграды.

На рис. 2 приведены хронограммы несимметричного эшелонированного взаимодействия группы из четырех ударников с преградой для моментов времени 3 и 10 мкс после начала процесса. Верхний фрагмент хронограммы (рис. 2,а) иллюстрирует момент, когда промежуточные два ударника только начали взаимодействовать с преградой, в то время как крайний справа ударник еще не подошел к ней, а крайний слева внедряется в нее, испытывая значительные пластические деформации, моделируемые с применением концепции разрушения эрозионного типа. На нижнем фрагменте (рис. 2,б) показан этап устойчивого внедрения остатков ударников в преграду.

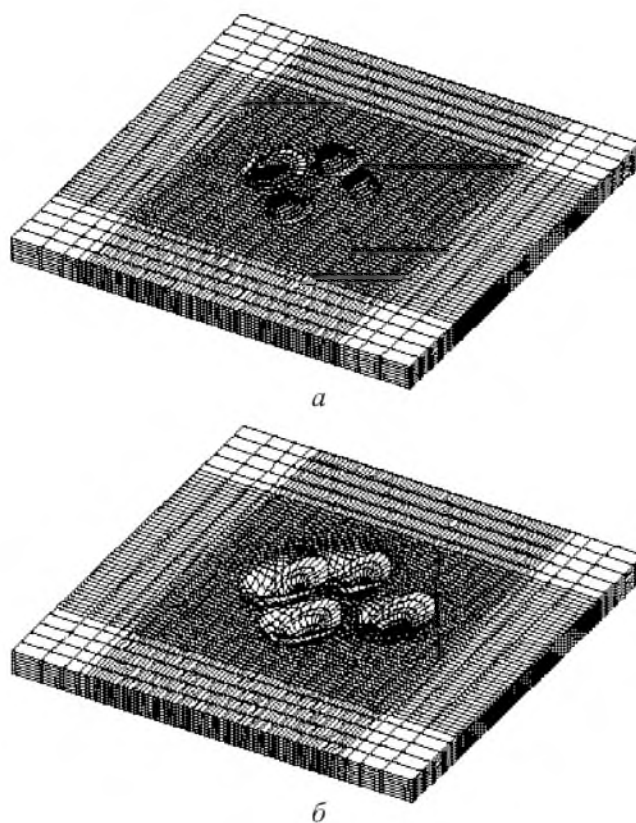


Рис. 2. Схема взаимодействия группы из четырех ударников с преградой в моменты времени 3 (а) и 10 (б) мкс после начала процесса несимметричного соударения.

Расчеты показали, что при заданных условиях взаимодействия наблюдается взаимное влияние процессов деформирования и разрушения в преграде. Представленные на рис. 3 распределения изолиний удельного объема микропор и удельной энергии сдвиговых деформаций на лицевой поверхности преграды (в каждом случае даны половинные сечения поверхности преграды из-за наличия плоскости симметрии) иллюстрируют слияние зон деформирования и повреждений от первого и промежуточных ударников.

Зона, образованная при воздействии крайнего справа ударника, несколько отстоит от объединенной области из-за более позднего начала соударения и большего начального расстояния между ударниками. Кроме того, на 17-й мкс (рис. 3,б) наблюдается дополнительный очаг повреждений между последним и средними ударниками, обусловленный их взаимным влиянием.

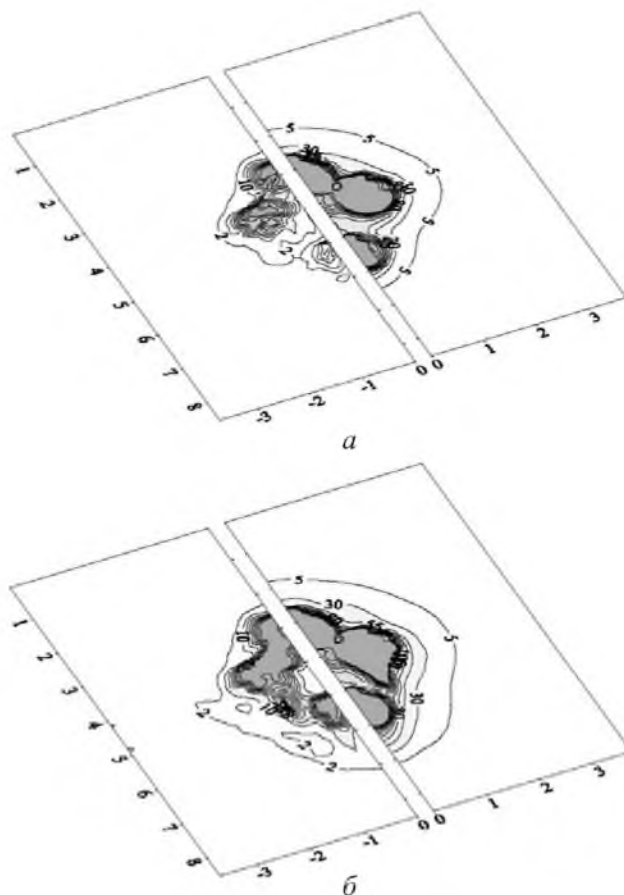


Рис. 3. Изолинии удельного объема микропор (слева,  $\Delta = 8 \text{ см}^3/\text{кг}$ ) и удельной энергии сдвиговых деформаций (справа,  $\Delta = 25 \text{ кДж/кг}$ ) на лицевой поверхности преграды в моменты времени 7 (а) и 17 (б) мкс.

Экспериментальные исследования процессов взаимодействия группы тел проводились на легкогазовой баллистической установке с последующим анализом сохраненных образцов. Первая серия экспериментов была направлена на определение площади откола в преграде конечной толщины в зависимости от плотности однородного потока высокоскоростных частиц. В качестве ударников использовались шарики из стали ШХ-15, их общее число в потоке колебалось от 2 до 7. Применялись четыре вида шариков диаметром 3; 4; 6 и 8 мм и массой соответственно 0,11; 0,26; 0,88 и 2,1 г. Начальную скорость ударников выбирали близкой к 3000 м/с; при таких скоростях наблюдается разрушение любых материалов, возникают интенсивные ударные волны и множественные откольные явления. Во всех испытаниях преградой служили стальные (Ст. 3) пластины толщиной 6; 8 и 10 мм.

На рис. 4 представлен полученный экспериментально вид тыльной поверхности преграды толщиной 8 мм для случая фронтального взаимодействия с ней четырех ударников диаметром 6 мм с начальной скоростью 2873 м/с. Взаимовлияние процессов внедрения у каждого ударника на разрушение преграды существенно зависит от начального расстояния между ними. В данном случае формируется общая для всех четырех ударников область тыльного откола. Три сквозных отверстия в преграде соединяются между собой, а сквозное отверстие, образованное крайним правым, более удаленным ударником, остается изолированным.

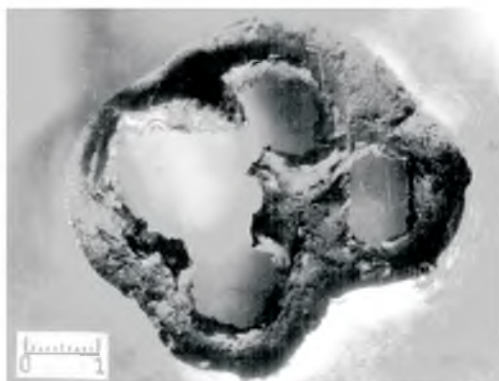


Рис. 4. Вид преграды с тыльной стороны после удара группы из четырех элементов.

На рис. 5,а приведены результаты измерений отношения суммарной площади откола  $S_f$  к суммарной площади одиночных отколов  $nS_0$  в зависимости от отношения начального расстояния между частицами  $l$  (расстояния между их центрами) к диаметру одиночного откола  $d_0$  при различном числе частиц  $n$  в потоке. При расстоянии между частицами, большем диаметра одиночного откола, суммарная площадь откола  $S_f$  с точностью до ошибки измерения равна  $nS_0$ . При сближении частиц (увеличении плотности потока) до расстояний, меньших  $d_0$ , суммарная площадь тыльного откола уменьшается тем быстрее, чем больше частиц в потоке. С точки зрения достижения наибольшей площади откола в преграде при ударе группой тел поток частиц должен быть разрежен до такой степени, чтобы каждый индивидуальный процесс внедрения протекал независимо от других. Дополнительный рост площади откола возможен при расстоянии между частицами, меньшем  $d_0$ , но близком к нему, вследствие взаимовлияния частиц.

Во второй серии экспериментов исследовалось изменение суммарной массы тыльного откола в преграде при неизменной общей массе однородных частиц в потоке, выбранной равной 20 г. В качестве базового варианта использовали один ударник массой 20 г. Толщина преграды составляла 10 мм, начальная скорость соударения – 3000 м/с. Рис. 5,б иллюстрирует значительный рост откольной массы (отношения суммарной массы откольных элементов к начальной массе частиц) при увеличении числа частиц  $n$  в потоке. Данный эффект близок к случаю перехода от ударника компактной формы к ударнику в форме пластины эквивалентной массы. Кинетическая



энергия пластины из-за большей начальной площади контакта с преградой будет в большей степени расходоваться на откольное разрушение преграды, а не на образование сквозного отверстия в ней и остаточную скорость запреградного потока. В условиях, когда откольное разрушение остается основным типом разрушения, простое “дробление” исходной высокоскоростной частицы существенно (в несколько раз) повышает эффект откольного разрушения в преграде.

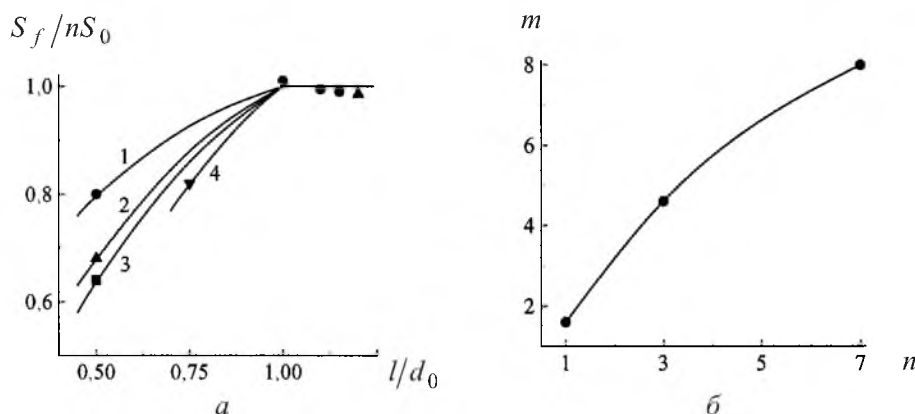


Рис. 5. Изменение суммарной площади (а) и полной массы (б) откольных элементов: 1 –  $n = 2$  (удар двух элементов); 2 –  $n = 3$ ; 3 –  $n = 4$ ; 4 –  $n = 5$ .

Таким образом, численное и физическое моделирование взаимодействия группы тел с преградами конечных размеров при фронтальном (синхронном) и эшелонированном (асинхронном) соударении показало существенное отличие от эквивалентного по энергии одиночного удара. Это проявляется в увеличении суммарной площади повреждения преград и усилении “шрапнельного” эффекта с поражением запреградной области, вызванного значительным ростом суммарной массы тыльных отколов. Дополнительный фактор, определяющий конечный результат соударения группы тел, – взаимовлияние внедряющихся частиц при определенном расстоянии между ними.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования РФ.

## Резюме

Експериментально і числовим шляхом у тривимірній постановці досліджуються процеси високошвидкісної взаємодії декількох компактних тіл із перешкодою скінченної товщини. В експериментах число частинок у однорідному потоці змінювалося від двох до семи при варіюванні щільності потоку (відстань між частинками). У розрахунках моделювався співудар із перешкодою чотирьох частинок при “фонтальному” і несиметричному ешелонованому ударі. Наведено отримані числовим шляхом конфігурації тіл і розподіл питомого об’єму мікропошкоджень у перешкоді, експериментальні дані щодо зміни площі і маси тыльних елементів, що відкололися. Дослід-

жено особливості деформування і руйнування перешкод у залежності від ступеня взаємовпливу частинок.

1. 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.
2. 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.
3. Хорев И. Е., Зелепугин С. А., Коняев А. А. и др. Разрушение преград группой высокоскоростных тел // Докл. РАН. – 1999. – 369, № 4. – С. 481 – 485.
4. Johnson G. R. High velocity impact calculations in three dimensions // J. Appl. Mech. – 1977. – No. 1. – P. 95 – 100.
5. Горельский В. А., Зелепугин С. А., Смолин А. Ю. Исследование влияния дискретизации при расчете методом конечных элементов трехмерных задач высокоскоростного удара // Вычислительная математика и математическая физика. – 1997. – 37, № 6. – С. 742 – 750.
6. Seaman L., Curran D. R., and Shokey D. A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. – 1976. – 47, No. 11. – P. 4814 – 4826.
7. 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. – 30, № 3. – С. 35 – 40.
8. Сугак С. Г., Канель Г. И., Фортвов В. Е. и др. Численное моделирование действия взрыва на железную плиту // Физика горения и взрыва. – 1983. – 19, № 2. – С. 121 – 128.
9. Gust W. H. High impact deformation of metal cylinders at elevated temperatures // J. Appl. Phys. – 1982. – 53, No. 5. – P. 3566 – 3575.
10. Зелепугин С. А., Никуличев В. Б. Численное моделирование взаимодействия серы и алюминия при ударно-волновом нагружении // Физика горения и взрыва. – 2000. – 36, № 6. – С. 186 – 191.
11. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Исследования механических свойств материалов при ударно-волновом нагружении // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 1999. – № 5. – С. 173 – 188.
12. Зелепугин С. А. Численное моделирование высокоскоростного взаимодействия тел с учетом модели разрушения эрозионного типа // Вычислительные технологии. – 2001. – 6, ч. 2. – С. 163 – 167.

Поступила 29. 12. 2002