

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕННОГО МАТЕРИАЛА ДИСКРЕТНЫМИ ЧАСТИЦАМИ КОНЕЧНОГО РАЗМЕРА

УДК 539.374

А. И. Гулидов, И. И. Шабалин

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,  
630090 Новосибирск

Процессы ударного взаимодействия твердых тел, как правило, сопровождаются разрушением, причем тип разрушения зависит от свойств материалов тел, формы ударника, скорости соударения и относительных геометрических размеров тел. В общем случае наблюдается некоторая комбинация типов разрушения [1, 2]. Подбором параметров соударяющихся тел удается сделать один из типов разрушения основным. Так, при проникании заостренного ударника из закаленной стали в преграду из мягкого материала разрушение происходит по типу пластического прокола [3]. При ударе тонкой пластины по преграде конечной толщины реализуется откольное разрушение [4]. Взаимодействие твердого цилиндра с плоской головной частью приводит к сдвиговому разрушению преграды с выбиванием пробки.

Моделирование процессов разрушения при численном решении задач высокоскоростного взаимодействия деформируемых тел возможно одним из следующих способов:

1) разрушенная среда остается сплошной, тензор напряжений корректируется с помощью функциональных соотношений [6, 7];

2) явное выделение макроскопических поверхностей разрушения введением дополнительных узлов разностной сетки так, чтобы эти поверхности проходили по границам ячеек; предельный случай — разделение разрушенной области тела на фрагменты, содержащие одну или несколько разностных ячеек [8–10];

3) альтернативный способ явного выделения макроскопических поверхностей разрушения состоит в локальной перестройке разрушенной ячейки; этот способ более общий, так как нет ограничений, связанных с границами ячеек разностной сетки [4];

4) среда предполагается состоящей из дискретных частиц правильной формы и разных размеров, частицы взаимодействуют по определенным законам, причем при деформировании такой среды может происходить смена соседей и образование новых связей [11, 12].

В данной работе предлагается континуально-дискретный подход представления среды при численном моделировании процессов высокоскоростного взаимодействия тел с учетом разрушения [13–15]. Близкий по идеологии подход применялся в [16, 17].

Для описания нестационарных процессов в механике деформируемого твердого тела широкое распространение получил лагранжев подход, в котором непосредственно рассчитываются движения свободных границ тел и контактных поверхностей между взаимодействующими телами, а также отсутствует искусственное перетекание материалов между областями, содержащими различные материалы, что позволяет проследить историю любой материальной частицы.

Уравнения упругопластической модели Прандтля — Рейса и постановка задачи о соударении деформируемых тел подробно рассматривались в [18–20]. Поскольку в процессе взаимодействия тел происходит разрушение материалов, то модель необходимо дополнить рядом критериев разрушения, в качестве которых выбраны максимальные растягивающие (а для хрупких материалов и сжимающие) деформации и напряжения, максимальные

сдвиговые деформации, внутренняя энергия и разрыхление  $\chi = 1 - \rho/\rho_0$  при  $\rho < \rho_0$ :

$$|\varepsilon_1| < \varepsilon_*, \quad |\sigma_1| < \sigma_*, \quad |\gamma_1| < \gamma_*, \quad e < e_*. \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_1, \gamma_1$  — максимальные деформации удлинения и сдвига;  $\sigma_1$  — максимальное растягивающее напряжение;  $\varepsilon_*, \sigma_*, \gamma_*, e_*$  — предельные прочностные характеристики материала. Превышение любого из них текущим значением соответствующей функции приводит к переходу среды в данной материальной частице в поврежденное состояние, под которым будем понимать состояние среды, оказывающее сопротивление только объемному сжатию. Частным случаем такого материала может быть жидкость. Параметр  $\chi$  характеризует способность поврежденной среды оставаться сплошной при объемном расширении, когда плотность вещества становится меньше начальной, и составляет несколько процентов (если  $\chi > \chi_*$ , то среда считается полностью разрушенной).

Все константы, входящие в исходные уравнения, начальные и граничные условия, считаются заданными. При численном решении задач соударения тел используется модифицированный метод Уилкинса [15, 18]. В каждой ячейке разностной сетки известны следующие величины: текущая плотность материала, тензоры напряжений и скоростей деформации, удельная внутренняя энергия. Координаты скорости отнесены к узлам разностной сетки. Алгоритм расчета реализован таким образом, что если в ячейке расчетной сетки выполнится хотя бы один из критериев (1), то в этой ячейке изменяется уравнение состояния материала, а сама ячейка помечается как поврежденная.

Далее, если ячейка с признаком поврежденного материала находится на границе расчетной области и разрыхление достигает критического, то материал данной ячейки заменяется дискретными частицами, радиус которых вычисляется из условия вписывания одной или нескольких частиц в ячейку. Масса данной ячейки распределяется между дискретными частицами. За один шаг по времени только один слой граничных ячеек может быть превращен в дискретные частицы, так как считается, что скорость фронта волны разрушения не превышает скорость распространения возмущения в среде. Поэтому в процессе взаимодействия тела при определенных условиях могут разделиться на фрагменты и даже «сработаться», т. е. полностью замениться системой дискретных частиц конечного размера.

Принципиальным в разностных уравнениях движения является представление вектора сил, действующего на материальную частицу, в виде слагаемых  $\mathbf{F} + \mathbf{R}$ , где  $\mathbf{F}$  определяется через компоненты тензора напряжений, а  $\mathbf{R} = 0$  для внутренних узлов и вычисляется для граничных [20, 21]. Это позволяет проводить расчет контактных границ между сплошным материалом, частицами и неразрушенной средой, а также между дискретными частицами по единому алгоритму.

Вычисления для каждого элементарного акта взаимодействия выполняются в два этапа. На первом этапе вектор  $\mathbf{R} = 0$  и определяется промежуточное положение частиц и граничных узлов. Затем выявляются те из них, для которых может нарушиться условие непроникания. Второй этап вычислений продемонстрируем на примере дискретной частицы и границы сплошного материала (рис. 1). Если для промежуточного положения частицы  $c$  и узлов граничного звена  $ab$  расстояние от центра частицы до отрезка меньше радиуса частицы, то для нормальных составляющих векторов  $\mathbf{R}_c, \mathbf{R}_a, \mathbf{R}_b$  записываются уравнения равновесия и моментов относительно точки  $k$  (рис. 1), подставив которые в условие равенства нормальных компонент вектора скорости в точке  $k$ , находим нормальные компоненты вектора сил реакций. При заданном законе трения путем аналогичной процедуры можно вычислить и касательную составляющую этих сил [20].

Так как дискретные частицы считаются несжимаемыми, то их движение определяется только  $\mathbf{R}$ . Если частица взаимодействует с набором частиц, то производится суммирование векторов сил по всему набору. Таким образом, введение силы  $\mathbf{R}$  позволит построить

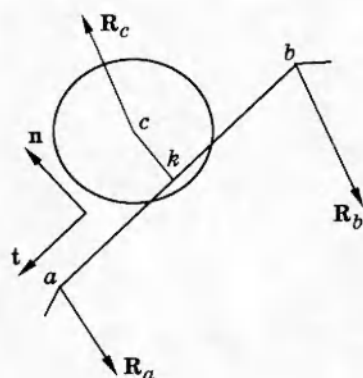


Рис. 1

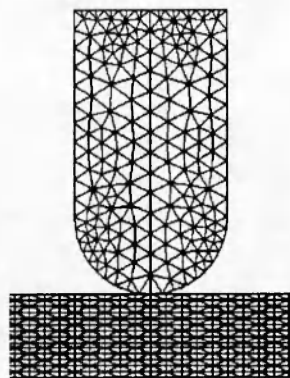


Рис. 2

однородный алгоритм решения уравнений движения материальных частиц.

Описанный выше подход реализован в виде программного комплекса KRUG24 для решения класса задач ударного взаимодействия упругопластических тел в двумерном случае.

В качестве примера рассмотрим решение задачи о пробитии алюминиевых преград свинцовой пулей. Аналогичная проблема экспериментально исследовалась в [22] для системы алюминиевых пластин, имеющих различные толщину, прочностные свойства и разнесение. При проведении расчетов использовались начальные данные, взятые из [22]. Свинцовая пуля считалась неразрушаемой, имела массу 11 г, радиус 0,278 см и сферическую головную часть. Диапазон изменения скоростей  $350 \div 390$  м/с. Параметры, характеризующие свойства материалов, следующие: для свинца  $\rho_0 = 11,34$  г/см<sup>3</sup>,  $K = 50$  ГПа,  $\mu = 5,7$  ГПа,  $Y_0 = 0,03$  ГПа, для алюминиевого сплава 6061-T6  $\rho_0 = 2,7$  г/см<sup>3</sup>,  $K = 73$  ГПа,  $\mu = 24,6$  ГПа,  $Y_0 = 0,28$  ГПа,  $\epsilon_* = 0,4$ ,  $\chi_* = 0,03$ .

Начальная разностная сетка в пуле и в части преграды приведена на рис. 2. При численном решении данной задачи была проведена серия методических расчетов по выяснению влияния сеточных параметров. В этих расчетах установлено, что дальнейшее увеличение числа ячеек разностной сетки не приводит к заметному изменению конечного результата, а только увеличивает время счета задачи. Кроме того, выяснено, что при замене разрушенного материала частицами достаточно одной частицы на ячейку.

Как показали расчеты, лучшее согласие с экспериментальными данными по остаточной скорости пули получается при использовании в модели разрушения первого критерия из (1). Величина  $\epsilon_*$  находилась в расчетах пробития одной пластины толщиной 1 мм и использовалась в дальнейшем. Следует заметить, что  $\epsilon_* = 0,4$  попадает в диапазон табличных значений предельной деформации на разрыв для алюминиевых сплавов в различных справочниках.

Для анализа были выбраны три конфигурации преграды: монолитная толщиной 3 мм, три пластины толщиной 1 мм, находящиеся в контакте, и разнесенная система из трех пластин по 1 мм. Начальная скорость удара  $U_0 = 355$  м/с.

Процесс взаимодействия пули с преградой существенно зависит от типа преграды. Так, разрушение преграды с разнесенными слоями характеризуется тем, что пробитие первого слоя происходит по типу выбивания пробки. Затем пуля с присоединенной пробкой вступает в контакт со следующим слоем, в котором процесс повторяется. При большом количестве слоев перед пулей накапливаются остатки с предыдущих слоев, причем слой, прилегающие к пуле, постепенно разрушаются полностью. В итоге пробития всей преграды пуля выносит впереди себя частично не разрушенные фрагменты слоев. Процесс пробития разнесенной преграды иллюстрирует рис. 3.

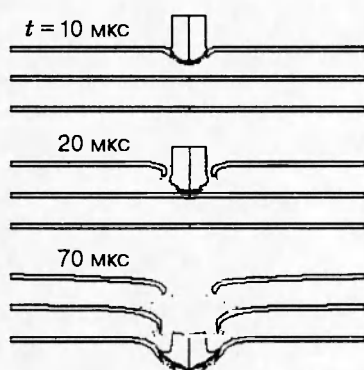


Рис. 3

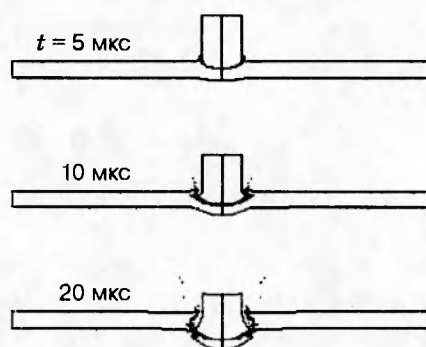


Рис. 4

При взаимодействии пули с монолитной преградой на начальной стадии процесс разрушения локализуется под головной частью пули. В дальнейшем на периферии ударника возникает зона разрушений материала преграды, прорастающая до тыльной поверхности, в результате чего образуется пробка, толщина которой несколько меньше толщины преграды. На рис. 4 приведены результаты расчета пробития монолитной преграды в разные моменты времени.

Особенность пробития преграды из трех контактирующих слоев состоит в том, что на начальной стадии процесса взаимодействия разрушение происходит в лицевом слое. Последующие слои значительно деформируются, и происходит разделение слоев. Разрушение в этих слоях начинается на оси симметрии, где находится область максимальных растягивающих деформаций. Процесс взаимодействия в разные моменты времени для данного случая показан на рис. 5.

На рис. 6 сравниваются расчетные результаты с теоретическими и экспериментальными [22] в координатах  $(\Delta U/U_0, H)$  для сплава 6061-Т6. Здесь  $U_0$  — начальная скорость пули;  $\Delta U$  — потеря скорости пули при пробитии преграды суммарной толщины  $H$ . На рис. 6 приведены данные для трех вариантов преград (1–3 — слоеная преграда без разнесения, монолитная и с разнесенными слоями). Теоретические кривые и экспериментальные точки взяты из [22]. Видно, что расчетные результаты находятся в хорошем соответствии с экспериментальными. В частности, подтвердился полученный в эксперименте факт наибольшей стойкости слоеной преграды без разнесения.

Таким образом, предлагаемые модель разрушения и метод расчета позволяют в рамках лагранжева подхода эффективно рассчитывать процессы взаимодействия деформиру-

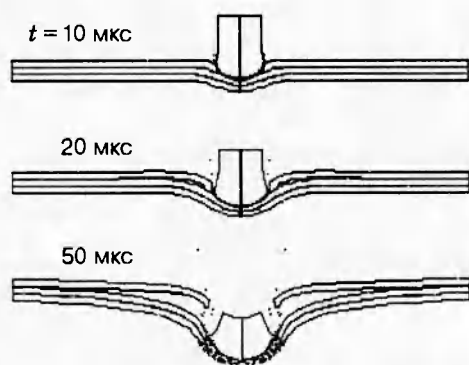


Рис. 5

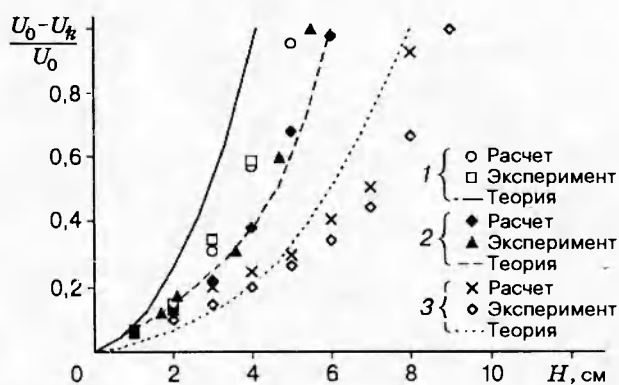


Рис. 6

емых тел, что подтверждается не только качественным, но и количественным соответствием расчетных результатов экспериментальным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Meyers M. A., Aimone C. T. Dynamic fracture (spalling) of metals // *Prog. Materials Sci.* 1983. V. 28. P. 1-96.
2. Hypervelocity Impact: Proc. Symposium, 1989 // *Int. J. Impact Eng.* 1990. V. 10, N 1-4.
3. Гулидов А. И., Фомин В. М., Яненко Н. Н. Численное моделирование проникания тел в упругопластическом приближении // *Проблемы математики и механики.* Новосибирск: Наука, 1983. С. 71-81.
4. Гулидов А. И., Шабалин И. И. Численное моделирование криволинейной трещины откола при соударении пластин // *Численные методы решения задач теории упругости и пластичности: Материалы 9-й Всесоюз. конф.* Новосибирск, 1986. С. 117-121.
5. Гулидов А. И., Фомин В. М., Шабалин И. И. Численное моделирование разрушения сдвигом // *Механика быстротекущих процессов.* Новосибирск, 1984. С. 48-51.
6. Киселев А. Б. О критерии динамического разрушения при ударном взаимодействии упругопластических тел // *Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика.* 1986. № 6. С. 46-51.
7. Майчен Дж., Сак С. Метод расчета «Тензор» // *Вычислительные методы в гидродинамике.* М.: Мир, 1967. С. 185-211.
8. Chen Y. M., Wilkins M. L. Stress analysis of crack problems with a three-dimensional, time-dependent computer program // *Int. J. Fracture.* 1976. V. 2, N 4. P. 607-615.
9. Bertholf L. D., Vuxton I. D., Thorue B. J., et al. Damage in steel plates from hypervelocity impact. II. Numerical results and spall measurement // *J. Appl. Phys.* 1975. V. 6, N 9. P. 3779-3783.
10. Реснянский А. Д., Мерзиевский Л. А. Применение метода подвижных сеток в задачах разрушения твердых тел // *Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики.* 1984. Вып. 64. С. 150-157.
11. Johnson G. R., Stryk R. A., Dodd J. G. Dynamic Lagrangian computation for solids, with variable nodal connectivity for severe distortion // *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 1986. V. 23. P. 509-522.
12. Ting J. M., Corkum B. T., Kauffman C. R., et al. Discrete numerical model for soil mechanics // *J. Geomech. Engng.* 1989. V. 115, N 3. P. 379-398.
13. Гладышев А. М., Гулидов А. И., Ковеня В. М. и др. Взрывное метание, аэродинамика и удар твердого тела. Численный эксперимент // *Моделирование в механике: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. ВЦ; ИТПМ.* 1991. Т. 5, № 2. С. 7-19.
14. Гладышев А. М., Гулидов А. И., Сапожников Г. А. и др. Применение принципов дискретно-континуального представления среды в задачах высокоскоростного взаимодействия тел // *Моделирование в механике: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. ВЦ; ИТПМ.* 1993. Т. 7, № 4. С. 36-51.
15. Гулидов А. И., Шабалин И. И. Метод свободных элементов. Приложение к решению задач разрушения упругопластических тел в процессе ударного взаимодействия. Новосибирск, 1994 (Препр. / ИТПМ СО РАН; № 9-94).
16. Johnson G. R., Stryk R. A., Halmquist T. J., et al. Recent EPIC code development for high velocity impact: 3D element arrangements and 2D fragment distributions // *Int. J. Impact Engng.* 1990. V. 10. P. 281-294.
17. Башуров В. В., Бурученко С. К. Моделирование задач высокоскоростного проникания в лагранжевых координатах // *Математическое моделирование.* 1992. Т. 4, № 6. С. 37-42.

18. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
19. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
20. Гулидов А. И., Шабалин И. И. Численная реализация граничных условий в динамических контактных задачах. Новосибирск, 1987 (Препр. / ИТПМ СО АН СССР; № 12-87).
21. Гулидов А. И. Организация вычислительного процесса и структуры данных при численном решении задач механики деформируемых сред // Моделирование в механике: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. ВЦ; ИТПМ. 1991. Т. 5, № 3. С. 127–141.
22. Marom I., Bodner S. R. Projectile perforation of multi-layered beams // Int. J. Mech. Sci. 1979. V. 21. P. 489–504.

*Поступила в редакцию 31/V 1995 г.,  
в окончательном варианте — 7/II 1996 г.*

---