

01;05

О механизме коллективного воздействия потока твердых частиц на преграду

© Э.Э. Лин, В.Ю. Мельцас, А.Л. Стадник, Ю.В. Янилкин

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров
E-mail: root@gdd.vniief.ru

Поступило в Редакцию 25 марта 2002 г.

Проведены двумерные и трехмерные численные расчеты проникания стального шарика в сплошную алюминиевую пластину и в пластину с заданным продольным каналом, имитирующим состояние материала в результате интерференции волн разгрузки. Результаты расчетов свидетельствуют в пользу эффективности интерференционного механизма воздействия потока твердых частиц на преграду.

1. Исследование одиночного и группового воздействия сравнительно легких (~ 1 г) низкоскоростных ($\sim 1-2$ км/с) твердых тел на преграды представляет интерес как с точки зрения моделирования догонных соударений космических конструкций с потоками техногенного мусора, так и в плане установления на „макроскопическом“ уровне механизмов проникания потоков твердых частиц малых размеров ($\leq 10^{-4}$ м) в твердые тела (см., например, [1–8]). В [1] на основе неравенств, связывающих начальную скорость частицы, ее размер и критическую скорость деформации, при превышении которой происходит сдвиговое упрочнение и отрывное охрупчивание материала, высказано предположение о возможности повышения эффективности проникания в материалы частиц достаточно больших размеров. В [2] рассматривается механизм уменьшения коэффициента сопротивления при движении тела в среде с противодавлением. В [4,5] рассматривается возникновение в преграде продольных каналов нарушения сплошности как результат интерференции (или фокусировки) волн разгрузки, источником которых являются как боковые грани частицы, так и тыльная поверхность соседних частиц. Возникающие в результате интерференции волн растягивающие напряжения приводят к резонансному возбуждению локализованной волны разрушения [5], связанной с дефектами материала на мезоскопическом уровне.

Автомодельный характер решения [5] для уединенной волны разрушения дает основание для попытки распространения подобных представлений на процессы проникания в преграды сравнительно крупных частиц (тел) с размерами более 1 мм. При этом, в отличие от [6], скорость удара должна быть меньше величины, необходимой для пробоя преграды одиночным телом. Только при соблюдении отмеченного „условия по скорости“ возможно выявление коллективного характера процесса воздействия тел на преграду.

Влияние интерференции волн разгрузки на состояние нагружаемого материала в первом приближении можно изучать расчетным путем, если искусственно задать наличие на оси удара полого канала (отверстия) с площадью поперечного сечения, значительно меньшей площади миделевого сечения проникающего тела. Тогда величина удельного импульса, действующего на материал, будет приблизительно такой же, как в случае сплошной преграды. В этом приближении влияние полого канала будет сводиться только к наличию разрыва сплошности нагружаемой среды. Проведение сравнительных расчетов удара тела по сплошной преграде и по преграде с упомянутым каналом может выявить влияние разрыва сплошности среды на эффективность проникания.

Ранее в [9] было экспериментально установлено, что при соударении со скоростью менее 500 м/с стального шарика диаметром 6.35 мм с алюминиевой пластиной толщиной 4.85 мм шарик „не замечает“ отверстия с диаметром менее одной трети диаметра шарика. Это связано с поверхностным (а не объемным) поглощением энергии при пробивании в указанных условиях. С целью выявления других возможных механизмов пробивания следует увеличить скорость удара, а диаметр шарика взять меньшим толщины пластины.

2. В данной работе рассматривалась задача соударения под углом 90° стального шарика радиусом $r = 2.5$ мм и алюминиевой преграды толщиной 15 мм как со сплошной, так и с продольной полостью вдоль оси удара. Скорость соударения взята равной $U = 1300$ м/с. Эта величина получена с помощью двумерных численных расчетов разгона шариков в вакуумированной ударной трубе взрывного действия [8]. Численное моделирование соударения проводилось по методикам, разработанным в [10,11]. Эти методики основаны на конечно-разностном представлении сплошной среды, для описания которой используется модель Уилкинса [12], и предназначены для моделирования течений с

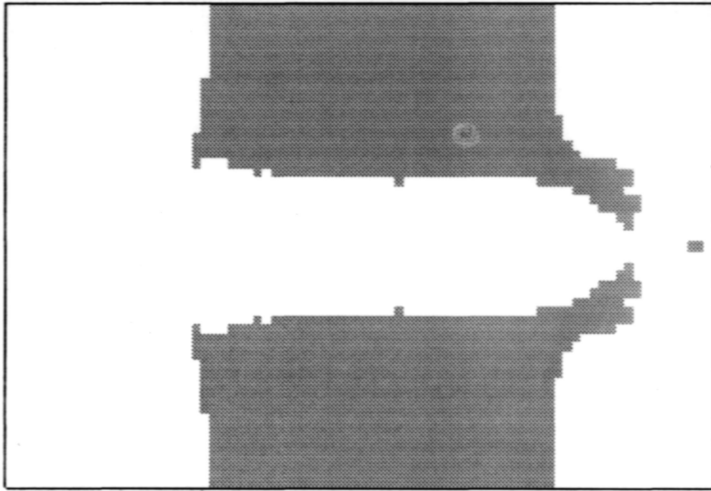


Рис. 1. Двумерная картина пробоя пластины. Поперечный размер канала $L = 0.75 \text{ mm}$, $t = 32 \mu\text{s}$.

большими деформациями контактных границ. Расчеты проводились в приближении идеальной упругопластической среды, описываемой уравнением состояния в форме Ми–Грюнайзена. Исследовалось влияние поперечного размера L полости на характер деформации преграды. В двумерных расчетах рассматривалась щель, в трехмерных — канал. Счетная сетка бралась равномерная с минимальным размером ячейки $h = 0.375 \text{ mm}$. Параметры преграды: плотность $\rho_0 = 2.7 \text{ g/cm}^3$, эффективная скорость звука $c = 5.5 \text{ km/s}$, показатель степени в уравнении Ми–Грюнайзена $n = 3.2$, коэффициент Грюнайзена $\gamma = 1.666$. Для учета прочности взяты следующие параметры: предел текучести $Y = 0.25 \text{ GPa}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0.33$. Шарик описывался параметрами: $\rho_0 = 7.8 \text{ g/cm}^3$, $c = 4.6 \text{ km/s}$, $n = 4$, $\gamma = 1.666$. Для учета прочности взяты следующие параметры: предел текучести $Y = 2.45 \text{ GPa}$, коэффициент Пуассона $\mu = 0.33$. В проведенной серии расчетов величина поперечного размера полости бралась равной $L = 0$ (сплошная преграда), $L = 0.375 \text{ mm}$ (одна счетная ячейка), $L = 0.75 \text{ mm}$ (две счетные ячейки).

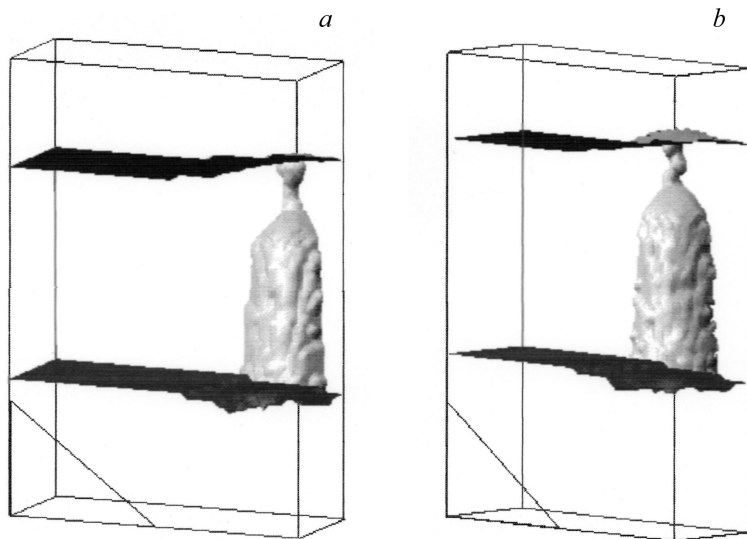


Рис. 2. Трехмерная картина проникания. Поперечный размер канала $L = 0.75$ mm. $a - t = 32 \mu\text{s}$, $b - t = 80 \mu\text{s}$.

Расчеты показали, что в сплошной пластине на момент времени $32 \mu\text{s}$ после удара происходит полное торможение шарика на глубине 12 mm. Расчетная глубина полного торможения соответствует обобщенной зависимости [7] отношения глубины проникания к диаметру снаряда от скорости соударения для сочетания материалов Fe/Al при скорости снаряда $U = 1300$ m/s. Это подтверждает правомерность используемой модели процесса. При наличии полости расчеты указывают на более глубокое проникновение шарика, практически соответствующее пробиванию пластины. Например, в двумерном расчете при $L = 0.75$ mm на момент времени $t = 32 \mu\text{s}$ происходит полное пробивание пластины (рис. 1). В трехмерном расчете при $L = 0.75$ mm на моменты времени 32 и $80 \mu\text{s}$ достигается состояние вблизи пробивания (рис. 2). Характерной чертой картины течения деформируемой среды является выдавливание шариком материала преграды в полость. При этом выдавливаемый материал не испытывает сопротивления, что и обуславливает более глубокое проникание шарика.

В представленной работе установлено, что при достаточно высокой скорости соударения шарик с диаметром, меньшим, чем толщина пластины, „чувствует“ наличие в ней полого канала с малой площадью поперечного сечения. Это свидетельствует в пользу эффективности интерференционных механизмов [4,5] воздействия потоков твердых частиц на преграды.

Авторы благодарят А.Л. Михайлова, С.А. Новикова, Г.В. Белова и В.А. Огородникова за ценные замечания и поддержку.

Список литературы

- [1] Григорян С.С. // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292. № 6. С. 1319–1323.
- [2] Бахрах С.М., Спиридонов В.Ф., Федорова Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. В. 1. С. 8–11.
- [3] Андилевко С.К., Ушеренко С.М., Шилкин В.А. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 17. С. 81–84.
- [4] Буравова С.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 63–67.
- [5] Naimark O., Collombet F., Lataillade J.-L. // J. PHYS. IV FRANCE. 1997. V. 7. P. 773–778.
- [6] Хорев И.Е., Зелепугин С.А., Коляев А.А. и др. // Докл. АН. 1999. Т. 369. № 4. С. 481–485.
- [7] Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. Динамика удара. М.: Мир, 1985. 296 с.
- [8] Лин Э.Э., Мельцас В.Ю., Новиков С.А. и др. // Химическая физика. 1998. Т. 17. № 1. С. 97–102.
- [9] Милейко С.Т., Кондаков С.Ф., Голофест Е.Г. // Проблемы прочности. 1979. № 12. С. 69–71.
- [10] Торопова Т.А., Янилкин Ю.В. // ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 1994. В. 4. С. 58–66.
- [11] Стадник А.Л., Тарасов В.И., Янилкин Ю.В. // ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 1995. В. 3. С. 52–60.
- [12] Уилкинс М.Л. // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.