

05.1

## Об эффективности коллективного воздействия твердых тел на преграду при умеренной скорости соударения

© Э.Э. Лин, С.К. Жабицкий, В.Ю. Мельцас, А.Л. Михайлов,  
С.А. Новиков, 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 9 апреля 2004 г.  
В окончательной редакции 22 июля 2004 г.

Исследуется коллективное воздействие твердых тел — стальных шариков на дюралюминиевые преграды при скорости соударения порядка 1 km/s. Экспериментально установленные факты более эффективного внедрения группы шариков в преграды по сравнению с внедрением одиночного шарика свидетельствуют о взаимном влиянии твердых тел в исследуемом процессе множественного удара.

1. Возрастающий интерес к исследованию множественного удара твердых тел по преграде (см., например, [1–5]) обусловлен отсутствием однозначных ответов на вопросы об эффективности и о механизмах такого воздействия. Коллективный характер процесса взаимодействия преграды с потоком твердых макроскопических тел наиболее отчетливо может проявляться в условиях, при которых одиночное воздействие оказывается слабым. Это возможно при умеренной скорости соударения  $U \ll U_*$ , где  $U_*$  — критическая скорость удара, выше которой прочностные свойства материала преграды не влияют на характер взаимодействия с ударником. Например, в случае алюминиевой преграды ( $U_* = 4000$  m/s [2]) это условие выполняется в узкой области скоростей  $U = 1000–2000$  m/s, для которой характерен перегиб эмпирической зависимости [6, с.177] отношения глубины  $z$  проникания ударника к его диаметру  $d$  от  $U$  для сочетания материалов ударника и преграды железо/алюминий. Данный перегиб связан с разрушением материала ударника при высоких давлениях. Это приводит к резкому изменению характера проникания твердого тела в среду преграды при одиночном

ударе, поэтому соответствующая ему область скоростей может представлять интерес с точки зрения эффективности множественного удара.

2. Указанные выше скорости соударения достигаются в схеме [7] направленного разгона стальных шариков продуктами взрыва плоского заряда твердого взрывчатого вещества, расширяющимися в канале вакуумируемой ударной трубы. Двумерные численные расчеты, проводимые по методу С.К. Годунова [8], показывают, что данная схема позволяет создавать потоки одинаковых стальных шариков, движущихся со скоростями от 1100 до 2700 м/с в зависимости от толщины заряда ( $\Delta = 4-9$  см) и диаметра шарика ( $d = 2-6$  мм). В проведенных опытах осуществлялись разгон 9 стальных шариков диаметром 5 мм (ГОСТ 3722-81 на шарики подшипников качения) и их воздействие на преграды из дюралюминия марки Д16-Т с толщинами  $h = 15$  мм и  $h = 100$  мм. С помощью импульсной рентгеновской установки наблюдались лидирующая группа шариков (4-5 штук), движущихся со скоростью  $U = 1400 \pm 100$  м/с, а также группа отстающих шариков, движущихся со скоростью  $U \approx 1100$  м/с. Оценки скорости получены путем сопоставления данных импульсной рентгеновской регистрации положения шариков с расчетными кривыми их движения. Разновременность ударов лидирующих шариков оценивается как  $\Delta t \sim 10^{-6}-10^{-5}$  с для двух близко расположенных шариков,  $\Delta t \sim 10^{-5}$  с для трех близко расположенных шариков и  $\Delta t \sim 10^{-4}$  с для группы из 4-5 шариков. В этих условиях происходило множественное сквозное пробивание дюралюминиевой пластины толщиной  $h = 15$  мм. Наблюдаются отдельные группы из „близких“ двух-трех пробоин, расположенных на расстояниях 10-25 мм друг от друга, а также „удаленные“ пробоины, расположенные на расстояниях 50-100 мм друг от друга. Обнаружены также отдельные шарики, проникшие в пластину на глубину около двух диаметров. По всей видимости, эти шарики принадлежали к отстающей группе.

В опыте с дюралюминиевой преградой толщиной 100 мм ( $h/d = 20$ ) зафиксировано проникание четырех шариков на глубину около 18 мм ( $z/d = 3.6$ ) при расстоянии между кратерами около 20 мм. Рядом с отмеченными четырьмя шариками обнаружен еще один, проникший на глубину около двух диаметров. По данным рентгеновской регистрации этот шарик заметно отставал от первых четырех.

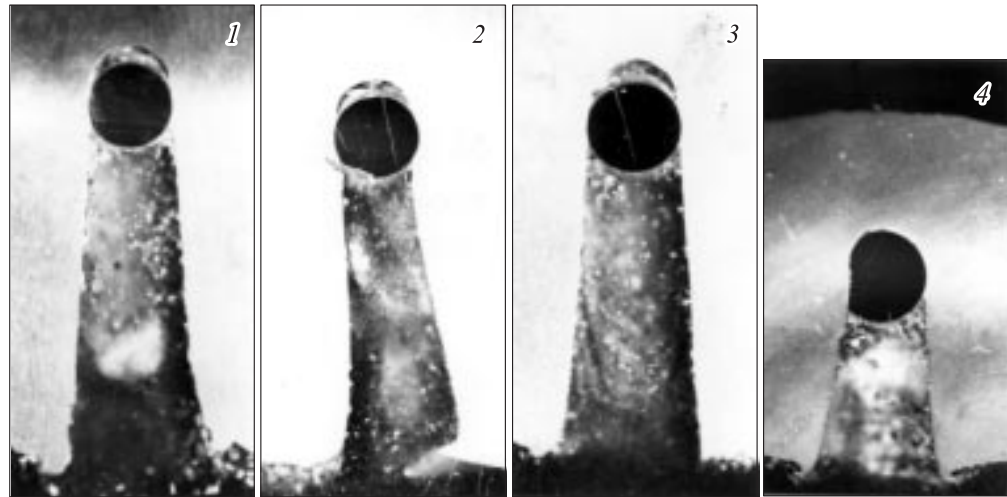
В специальном опыте по воздействию одного стального шарика на плоскую дюралюминиевую пластину толщиной 15 мм при скорости

соударения  $U = 1300 \pm 100$  m/s зафиксирована безразмерная глубина проникания  $z/d = 2.2$ , которая согласуется с зависимостью [6] в пределах погрешности измерения скорости.

Установленная безразмерная глубина проникания  $z/d = 3.6$  группы близко расположенных стальных шариков в „толстую“ дюралюминиевую преграду приблизительно в 1.6 раза больше, чем предсказывает упомянутая выше зависимость [6]: при скорости удара  $U = 1400$  m/s безразмерная глубина проникания одиночного ударника составляет  $z/d = 2.3$ . С этим связано наблюдаемое множественное сквозное пробивание „тонких“ пластин с безразмерной толщиной  $h/d = 3$ .

Металлографическое исследование сохраненных образцов показало следующее. В преграде с  $h/d = 20$  между шариками, проникшими на глубину  $z/d = 3.6$ , и дном кратера существует заметный зазор, толщина которого на оси удара составляет около  $0.25d$  (рис. 1). В опыте с одиночным шариком зазор, образовавшийся между его передней поверхностью и дном кратера, составляет около  $0.05d$ , что значительно меньше, чем при множественном ударе. На „передней“ поверхности шариков остались слои дюралюминия толщиной до  $10 \mu\text{m}$ . Все шарики характеризуются наличием трещин различной протяженности порядка диаметра и толщиной  $\sim 10^{-3}d$ , ориентированных приблизительно в направлении удара. В приповерхностном слое кратеров имеются трещины и разрывы. Во всех исследованных сечениях образцов в зоне расположения шариков наблюдаются следы оплавления дюралюминиевых преград. Материал шариков также частично оплавлен по поверхности. В опытах с преградами с  $h/d = 3$  на стенках сквозных пробоин также обнаружен тонкий слой расплавленного дюралюминия. На поверхности найденного после опыта стального шарика, пробившего преграду, обнаружены включения из расплавленного дюралюминия.

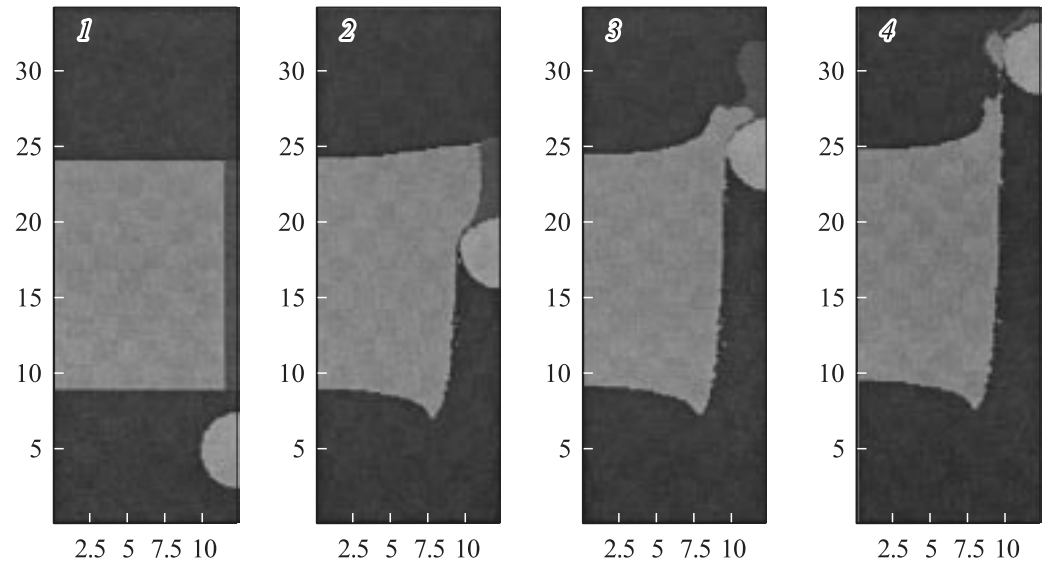
3. Полученные экспериментальные результаты указывают на существование взаимного влияния шариков в процессе взаимодействия с преградой. Измеренным расстояниям между пробоинами и кратерами (от 10 до 100 mm) соответствуют характерные времена распространения упругих волн в преграде  $t_{el} \approx 2-20 \mu\text{s}$  (эффективная скорость звука в алюминии приблизительно равна 5500 m/s [9]), а также характерные времена распространения пластических волн  $t_{pl} \approx 25-250 \mu\text{s}$  (скорость пластической волны  $\approx 400$  m/s [10]). В совокупности величины  $t_{el}, t_{pl}$  сравнимы с величинами  $\Delta t$  разновременности отдельных ударов. Это означает, что в течение процесса соударения материал преграды охвачен упругими и пластическими волнами. Взаимодействие этих волн



**Рис. 1.** Структуры кратеров при множественном и одиночном ударах: 1–3 — опыт с группой шариков, 4 — опыт с одиночным шариком. Срезы на шлиф-образцах выполнены не строго по экваториальному сечению шариков. Диаметры сечения шариков на шлиф-образцах равны 4 мм (1), 3.5 мм (2), 4 мм (3). Кажущаяся относительная глубина проникания шариков на фотографиях больше фактической величины  $z/d$ , определенной по данным измерений диаметра шариков  $d = 5$  мм до опыта (с помощью штанген-циркуля) и измерений глубины  $z_1 = 13$  мм от приемной поверхности преграды до шарика сразу после опыта (с помощью глубиномера). Фактическая глубина проникания равна  $z = z_1 + d = 18$  мм, относительная глубина проникания  $z/d = 3.6$ .

приводит к локализованному вблизи шариков ослаблению прочностных характеристик среды. В пользу этого прямо свидетельствует наличие более развитого зазора между каждым шариком и дном кратера при множественном ударе, чем при одиночном ударе (рис. 1). Согласно [1,5], механизм разупрочнения может быть связан с переходом среды преграды в жидкое состояние под действием волн давления. В пользу этого свидетельствует наличие расплавленного дюралюминия на дне и на стенках кратеров. Согласно [3,4], другим возможным механизмом разупрочнения в процессе ударного воздействия может быть эффективное накопление повреждений на первоначальных дефектах в материале преграды. В пользу этого свидетельствует наблюдаемый разрыв материала преграды впереди затормозившихся ударников (слой дюралюминия на передней поверхности шариков на рис. 1). Можно полагать, что в условиях множественного удара осуществляется совместное действие упомянутых механизмов разупрочнения в локализованных областях вблизи шариков. Полученные экспериментальные данные не противоречат этому предположению.

Влияние потери прочности среды на характер процесса соударения стального шарика с алюминиевой преградой исследовалось расчетным путем по методике [11,12]. Физико-механические характеристики материалов ударника и преграды даны в [12]. Получено, что в исследуемых условиях соударения ( $h = 15 \text{ mm}$ ,  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $U = 1300 \text{ m/s}$ ) одиночный шарик полностью затормаживается в преграде на глубине 12 mm, если среда не теряет прочности и сплошности. Расчетная глубина проникновения согласуется с упомянутой выше эмпирической зависимостью [6] для сочетания материалов ударника и преграды железо/алюминий. Одновременный удар множества шариков, ориентированных в плоскости удара в периодическом порядке, имитируется наложением абсолютно жестких стенок, параллельных оси удара. Неодновременный удар имитируется заданием свободных границ, удаленных от оси удара. Локализованная полная потеря прочности сплошной среды имитируется заданием величины предела текучести, равной нулю в узкой канальной области вдоль оси удара. Такой упрощенный подход связан с быстрым накоплением повреждений в ударно нагружаемом материале с масштабом времени фоновых возбуждений, равным  $\sim 10^{-13} \text{ s}$ . В расчетах получено, что сквозное пробивание преграды происходит как при наличии абсолютно жестких стенок (рис. 2), так и в случае свободных границ. Следовательно, при потере прочности среды синхронность множественного удара не имеет существенно важного значения.



**Рис. 2.** Двумерное сечение трехмерной расчетной картины пробивания дюралюминиевой преграды стальным шариком (размеры указаны в mm). Выделена узкая канальная область на оси удара с величиной предела текучести, равной нулю. На оси абсцисс в сечении  $x = 0$  задано наличие абсолютно жесткой стенки. Кадр 1 —  $t = 0$ , 2 —  $t = 15 \mu\text{s}$ , 3 —  $t = 30 \mu\text{s}$ , 4 —  $t = 50 \mu\text{s}$ .

В данной работе установлена повышенная эффективность коллективного воздействия твердых тел на преграду при умеренной скорости соударения. Выявление же механизма разупрочнения материала преграды при множественном ударе требует проведения дальнейших исследований.

Авторы благодарят А.В. Гладцинова, Ю.М. Макарова, Г.Ф. Портнягину, С.В. Прохорова, Н.А. Юкину за помощь в проведении исследований.

Работа выполнена в рамках контракта В526446 с Ливерморской национальной лабораторией имени Лоуренса, США.

## Список литературы

- [1] Буравова С.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 17. С. 63–67.
- [2] Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 600 с.
- [3] Хорев И.Е., Зелепугин С.А., Коняев А.А. и др. // Докл. РАН. 1999. Т. 369. № 4. С. 481–485.
- [4] Хорев И.Е., Якушев В.К., Зелепугин С.А. и др. // Докл. РАН. 2003. Т. 389. № 2. С. 197–202.
- [5] Роман О.В., Андилевко С.К., Карпенко С.С. и др. // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75. № 4. С. 187–199.
- [6] Зукас Дж.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грещук Л.Б., Куран Д.Р. Динамика удара. М.: Мир, 1985. 296 с.
- [7] Лин Э.Э., Мельцас В.Ю., Новиков С.А. и др. // Химическая физика. 1998. Т. 17. № 1. С. 97–102.
- [8] Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
- [9] Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [10] Колегов Л.Е., Лин Э.Э., Рязанов В.Т., Фунтиков А.И. // ПМТФ. 1991. № 6. С. 93–97.
- [11] Стадник А.Л., Тарасов В.И., Янилкин Ю.В. // ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 1995. В. 3. С. 52–60.
- [12] Лин Э.Э., Мельцас В.Ю., Стадник А.Л., Янилкин Ю.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 17. С. 90–94.