

О характере разрушения преград при множественном ударе твердых тел с умеренной скоростью

Р. И. Илькаев, Э. Э. Лин,
А. Л. Михайлов, В. В. Бурцев,
П. С. Бушмелев, А. В. Гладцинов,
Н. Ю. Илюшкина, В. Е. Коломийцев,
Ю. М. Макаров, В. Ю. Мельцас,
Л. А. Морозова, Г. Ф. Портнягина,
А. Л. Стадник, З. В. Танаков,
Н. А. Юкина, Ю. В. Янилкин

На основе анализа результатов первых экспериментов по исследованию множественного воздействия макроскопических твердых тел на твердые преграды при умеренной скорости соударения предлагается гипотеза о ведущей роли интерференции волн напряжений в нагружаемой среде, приводящей к уменьшению сопротивляемости среды вблизи ударников и к их более эффективному внедрению по сравнению с одиночным воздействием.

Интерес к лабораторным исследованиям удара группы твердых тел по преграде связан с определением механизмов отклика объектов на воздействия потоков фрагментов техногенного происхождения (см., например, [1–5]). Нерегулярный режим множественного воздействия в реальных условиях, выражающийся в асинхронности ударов и в пространственной неоднородности распределения фрагментов, обуславливает образование в нагружаемой среде неупорядоченной системы упругих и пластических волн напряжений. Интерференция волн приводит к локализованным изменениям прочностных характеристик среды. Эти изменения могут оказать влияние на проникание ударников, движущихся со скоростями, при которых эффекты сжатия и нагрева сравнительно слабы, и главную роль играют деформационные (прочностные) механизмы [1].

В данной работе представляются результаты экспериментальных исследований и численных расчетов, направленных на определение характера разрушений преград при асинхронном множественном ударе макроскопических твердых тел с умеренными скоростями. Средняя величина скорости соударений $\langle U \rangle = 1,2\text{--}1,4$ км/с компактной группы стальных шариков диаметром $d = 5$ мм с дюралюминиевыми преградами с относительными толщинами $h/d = 3\text{--}20$ определялась путем сопоставления данных рентгеновской регистрации (рис. 1) положения ударников в заданные моменты времени в приемном отсеке вакуумируемой взрывной ударной трубы [3, 6] с результатами двумерных численных расчетов их движения в условиях опытов. Разновременность ударов шариков, определяемая по данным рентгеновской регистрации, а также измеренная с помощью либо электроконтактных, либо манганиновых датчиков, располагаемых в слоистых преградах, лежит в диапазоне $\Delta t = 3\text{--}200$ мкс и сравнима с временами распространения упругих

($\sim 10^{-6}$ – 10^{-5} с) и пластических ($\sim 10^{-5}$ – 10^{-4} с) волн между пробойнами и кратерами в материале преграды, зафиксированными на расстояниях друг от друга, лежащих в интервале 10–100 мм. Установленные факты множественного сквозного пробивания преград с $h/d = 3$, а также проникания групп шариков в более толстые преграды на относительные глубины $z/d = 2,8$ – $4,1$, когда среднее по двенадцати измерениям значении $\langle z/d \rangle = 3,6$ (со среднеквадратичным отклонением $\pm 0,1$) в 1,6 раз превышает глубину проникания $z/d = 2$ – $2,2$ при одиночных ударах, свидетельствуют об эффективности взаимного влияния шариков в процессе множественного внедрения.

Подробное металлографическое исследование сохраненных образцов показало следующее. При внедрении одиночного шарика и группы шариков в преграды, кроме плавления среды в прилегающих боковых слоях с толщинами $x = 5$ – 20 мкм, впереди затормозившихся шариков происходило образование смешанных областей перекристаллизации и плавления материала с толщинами $x = 20$ – 60 мкм. При одиночном и множественном воздействиях зафиксированы следы локализованной фрагментации ударников и преград с размерами до 10–20 мкм в зонах их непосредственного контакта. Характерным отличием множественного удара от одиночного являются разрывы материала в виде трещин неправильной формы с протяженностью до 1 мм вблизи пробойн в "тонких" преградах с $h/d = 3$ (рис. 2). На осях множественных ударов между дном кратеров в "толстых" преградах $h/d = 20$ и передней поверхностью шариков развиваются зазоры около 1 мм, что в 3–5 раз больше, чем при одиночных ударах [6]. Распределение микротвердости H материала преграды вдоль пробойн вблизи их стенок имеет волнообразный характер в диапазоне изменения $H = 0,8$ – $1,1$ ГПа (рис. 3). Распределение микротвердости между соседними пробойнами также не монотонно: величина H уменьшается от 1 ГПа на стенках пробойн до 0,86 ГПа на середине расстояния между ними. На стенках кратеров после одиночного удара $H = (1,01 \pm 0,03)$ ГПа, после множественного удара $H = (0,89 \pm 0,02)$ ГПа. Микротвердость на дне кратеров в участках с перекристаллизовавшейся структурой имеет большой разброс из-за неоднородности структуры и лежит в интервале $H = 1,53$ – $2,04$ ГПа. Микротвердость материала преграды вдали от пробойн и кратеров значительно меньше, чем в областях внедрения шариков и составляет $H = 0,66$ – $0,76$ ГПа.

Таким образом, наряду с деформационными процессами [1] сдвигового упрочнения (измерения микротвердости) и отрывного охрупчивания (наличие сколов и трещин) материала преграды сущест-

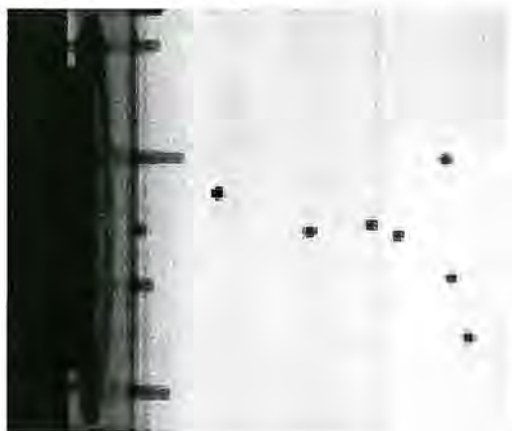


Рис. 1. Рентгеновское изображение стальных шариков перед ударом по преграде (мишень слева, шарики движутся справа налево, $d = 5$ мм, $t = 2,74$ мс от момента подрыва)



Рис. 2. Структура материала преграды вблизи выхода из пробойны

вует ряд особенностей исследуемого явления. Процессы перекристаллизации, плавления и фрагментации материала в тонких по сравнению с диаметром шарика слоях связаны со сдвиговыми течениями среды в малых пространственных масштабах вблизи ударников и протекают одинаково как при одиночном, так и при множественном ударах. Времена распространения тепловой волны на базе толщины оплавленных слоев преград, оцененные в приближении линейной теплопроводности [7], составляют $\tau = x^2/4\chi = 0,1-1,6$ мкс ($\chi = \kappa/\rho c_p$ – коэффициент температуропроводности среды, κ , ρ , c_p – соответственно, коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость [8]). Эти верхние оценки времени плавления материала преграды меньше нижней оценки $d/U = 3,6-3,8$ мкс характерного масштаба времени проникания шариков на начальной стадии соударения. Следовательно, процессы плавления в тонких слоях являются лишь "затравочными" для макроскопического разрушения среды и проникания ударника на значительные глубины. Образование сравнительно крупномасштабных внутренних разрывов в преграде, волнообразный характер распределения микротвердости вдоль пробойн, а также образование сильно развитых зазоров между шариками и дном кратеров на осях множественных ударов прямо свидетельствуют об эффективном взаимодействии упругих и пластических волн напряжений, приводящем к уменьшению сопротивляемости материала за счет развития первоначальных дефектов и к более глубокому прониканию шариков.

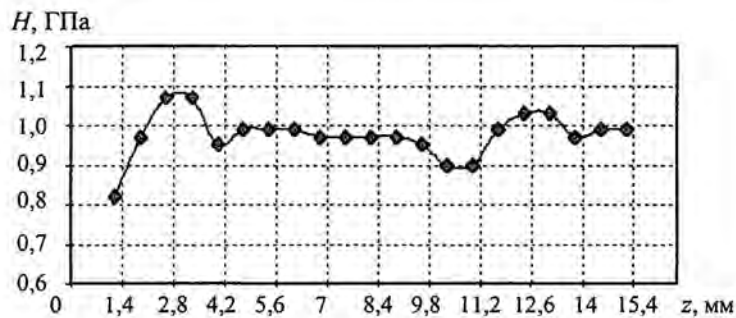


Рис. 3. Распределение микротвердости материала преграды вдоль стенки пробойны

Трехмерные численные расчеты по методу [6, 9] показывают, что уменьшение предела текучести среды σ_f перед ударником в канальной области с поперечным размером d до величин меньше половины от стандартного значения σ_f приводит к заметному увеличению глубины проникания в толстую преграду (рис. 4).

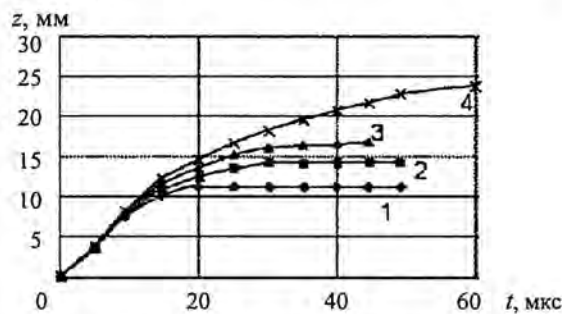


Рис. 4. Расчетные кривые проникания стального шарика в алюминиевую преграду при вариации предела текучести среды перед ударником в канальной области с поперечным размером d ($d = 5$ мм, $h = 100$ мм, $U = 1300$ м/с, время отсчитывается от момента соударения): 1 – $\sigma_f = 0,125$ ГПа (стандартное значение равно 0,25 ГПа [6]), 2 – $\sigma_f = 0,0625$ ГПа, 3 – $\sigma_f = 0,03125$ ГПа, 4 – $\sigma_f = 0$

Совокупность представленных результатов дает основания для вывода о том, что при коллективном воздействии макроскопических твердых тел с умеренной скоростью на твердые преграды происходит ослабление сопротивляемости среды вблизи ударников в результате интерференции создаваемых ими волн напряжений.

Список литературы

1. Григорян С. С. О природе "сверхглубокого" проникания твердых микрочастиц в твердые материалы // ДАН СССР. 1987. Т. 292, № 6. С. 1319–1323.
2. Буравова С. Н. Эффект фокусировки волн разгрузки и повреждаемость преграды под действием потока частиц // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 17. С. 63–67.
3. Lin E. E., Mel'tsas V. Yu., Novikov S. A., Pashchenko E. N., Sirenko A. V., Tikhomirov B. P. Investigation of Directed Group Acceleration of Solid Fragments by Expanding Explosive Products // Proc. of 16th Int. Ballistics Symposium and Exhibition, San Francisco, CA, September 23–27. 1996. Vol. 2. P. 651–663.
4. Хорев И. Е., Зелепугин С. А., Коняев А. А., Сидоров В. Н., Фортон В. Е. Разрушение преград группой высокоскоростных тел // ДАН. 1999. Т. 369. № 4. С. 481–485.
5. Хорев И. Е., Якушев В. К., Зелепугин С. А., Сидоров В. Н., Фортон В. Е. Метание и соударение группы высокоскоростных тел // ДАН. 2003. Т. 389. № 2. С. 197–202.
6. Лин Э. Э., Жабицкий С. К., Мельцас В. Ю., Михайлов А. Л., Новиков С. А., Стадник А. Л., Янилкин Ю. В. Об эффективности коллективного воздействия твердых тел на преграду при умеренной скорости соударения // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 2. С. 6–12.
7. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. С. 688.
8. Григорьев И. С., Мейлихов Е. З. (ред.). Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 1232.
9. Стадник А. Л., Тарасов В. И., Янилкин Ю. В. Эйлера методика расчета трехмерных упруго-пластических течений многокомпонентной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 1995. Вып. 3. С. 52–60.

The Character of Obstacle Destruction Under the Multiple Shock of Solids Flying With Moderate Velocities

R. I. Il'kayev, E. E. Lin, A. L. Mikhaikov, V. V. Burtsev, P. S. Bushmelev,
A. V. Gladtsinov, N. Yu. Ilyushkina, V. E. Kolomijtsev, Yu. M. Makarov,
V. Yu. Mel'tsas, L. A. Morozova, G. F. Portnyagina, A. L. Stadnik,
Z. V. Tanakov, N. A. Yukina, Yu. V. Yanilkin

Based on the results of the first experiments, aimed at study of multiple impacts of macroscopic solids on solid obstacles at moderate velocity of collision, the hypothesis was set forth, assuming the leading role of stress waves interference in the medium under load, leading to the reduced resistivity of the medium in the vicinity of projectiles and their more effective embedding as opposed to the solo impacts.