УДК 539.4.019; 539.37

О ВЛИЯНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ПРОЦЕСС РАЗРУШЕНИЯ ПРЕГРАДЫ ПРИ МНОЖЕСТВЕННОМ УДАРЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Э. Э. Лин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Предлагается объяснение повышенной эффективности внедрения группы твердых тел в твердые преграды при умеренной скорости множественного соударения.

Ключевые слова: множественный удар, твердое тело, жидкая фаза, граница раздела, адсорбционное понижение прочности, растягивающее напряжение.

Вопрос об эффективности и механизмах осколочного действия взрыва до сих пор представляет научный и практический интерес [1]. Ряд работ [2–8] посвящен изучению коллективного воздействия макроскопических твердых тел на преграды. В [5–8] экспериментально установлены факты более глубокого проникания группы стальных шариков диаметром $d = 5$ мм в дюралюминиевые преграды по сравнению с прониканием одиночного шарика при «умеренной» скорости соударения $u = 1.2 \div 1.4$ км/с, когда эффекты сжатия и нагрева сравнительно слабы и главную роль играют деформационные (прочностные) процессы. В данной работе предпринята попытка объяснить обнаруженный эффект с точки зрения общеизвестных представлений [9] о поверхностных явлениях в твердых телах в процессах их деформации и разрушения, обусловленных адсорбционным понижением прочности на границах раздела твердой и жидкой фаз при наличии растягивающих напряжений.

Металлографический анализ сохраненных образцов показал наличие оплавленных слоев толщиной $x = 5 \div 20$ мкм на стенках пробоин и кратеров как при одиночном, так и при множественном ударе, а также наличие сколов и трещин размерами до $l = 10 \div 20$ мкм. Аналогичные следы оплавления и фрагментации среды имеются и «на поверхности» ударников. При этом наблюдается проникновение мелких фрагментов ударников в преграду и наличие расплавленных частиц преград на поверхности ударника. Вместе с тем отличительными особенностями множественного удара являются наличие развитых боковых трещин протяженностью до 1 мм, а также зазоров около 1 мм между активной поверхностью ударника и дном кратеров, в 3–5 раз превышающих величину зазоров при одиночных ударах. Измерения показали, что микротвердости на стенках пробоин и кратеров заметно больше, чем вдали от областей внедрения шариков.

Полученные экспериментальные данные указывают на протекание конкурирующих деформационных процессов [10] сдвигового упрочнения (измерения микротвердости) и отрывного охрупчивания (сколы и трещины) материала преграды. Приведенные в [8] оценки характерных времен распространения тепловой волны на базе толщины оплавленных слоев (верхние оценки времени плавления) $\tau = x^2/4\chi = 0.1 \div 1.6$ мкс ($\chi = æ/\rho c_p$ — коэффициент температуропроводности среды, æ — коэффициент теплопроводности, ρ — плотность, c_p — удельная теплоемкость) и характерного масштаба времени проникания шариков на начальной стадии соударения $d/u = 3.6 \div 3.8$ мкс показывают, что процессы плавления в тонких слоях, обусловленные сдвиговыми течениями среды в малых пространственных масштабах и протекающие одинаково как при одиночном, так и при множественном ударах, являются «затравочными» для макроскопического разрушения среды и проникания ударника на значительные глубины. При множественном ударе твердых тел взаимодействие создаваемых ими волн напряжений приводит к уменьшению сопротивляемости материала за счет развития первоначальных дефектов и к более глубокому прониканию ударников по сравнению с одиночным твердым телом.

В свете представлений [9] об адсорбционном понижении прочности (эффект Ребиндера) установленные в [5–8] экспериментальные фак-

ты оплавления материала преграды, образования сколов и трещин на поверхностях пробоин и кратеров, а также повышенной эффективности внедрения группы «взаимодействующих» ударников указывают на то, что на исследуемый процесс множественного соударения твердых тел с преградами может оказывать влияние контакт твердой фазы с собственным расплавом и соответствующее значительное уменьшение свободной поверхностной энергии σ на границе раздела фаз (и соответственно работы образования новой поверхности). Сопутствующее этому уменьшению понижение прочности (охрупчивание) твердой фазы приводит к образованию первоначальных разрушений на дефектах материала (дислокации, примеси, границы зерен и т. п.). При растягивающих напряжениях эти разрушения необратимо развиваются. Источниками растягивающих напряжений являются как «соседние» ударники, так и свободные поверхности кратеров, создаваемых этими ударниками (концентраторы напряжений). Наличие конкурирующего процесса сдвигового (пластического) упрочнения среды внедрения ограничивает глубину проникания в «толстые» преграды, например, за счет перекристаллизации, приводящей к заметному увеличению микротвердости преграды перед ударником (см. [7]).

Оценки, выполненные на основе соотношений и данных [9, 11], показывают, что для алюминия на химически однородной границе «твердая фаза — расплав» межфазная удельная свободная поверхностная энергия σ_{sl} значительно меньше удельной свободной поверхностной энергии σ_l жидкой фазы: $\sigma_{sl} \leqslant \sigma_l(Q_m/Q_v)$, Q_m, Q_v — изменение энергии при плавлении и испарении соответственно. Отсюда получаем $\sigma_{sl} \leqslant 26$ мДж/м^2, что приблизительно в 44 раза меньше удельной свободной поверхностной энергии твердого Al, равной $\sigma_0 = 1\,140$ мДж/м^2. Критическая величина растягивающих напряжений в преграде, которая определяется из критического условия равенства высвобождаемой объемной упругой энергии, запасенной в теле, и энергии, поглощаемой на образование свободной поверхности, и оценивается согласно [9] как $p_{cr} \approx (G\sigma_{sl}/l)^{1/2} \approx 10^7$ Па (G — модуль сдвига, $l \approx 10^{-5}$ м — характерный размер наблюдаемых трещин и сколов), приблизительно на два порядка меньше оцененной в [4] амплитуды $p_{\max} \approx 10^9$ Па волн упругих напряжений, создаваемых на поверхности кратера соседними ударниками. Упомянутое выше взаимодействие упругих волн напряжений, создаваемых в условиях множественного удара, может привести к еще большему превышению амплитуды растягивающих напряжений над критическим значением p_{cr}. В условиях хрупкого разрушения твердой фазы это может вызвать заметное уменьшение прочности (сопротивления) P преграды по Гриффитсу по сравнению с исходной прочностью P_0: $P/P_0 = (\sigma_{sl}/\sigma_0)^{1/2} \approx 0.15$, т. е. приблизительно в 6.6 раз. В соответствии с обобщенной гидродинамической моделью проникания [12], учитывающей эффект прочности при скоростях удара ≈ 1 км/с, это приводит к увеличению глубины кратера в толстой преграде $z \propto (P)^{-1/6}$ в ≈ 1.4 раза. В экспериментах [5–8] среднее по двенадцати измерениям значение относительной глубины проникания при множественных ударах $\langle z\rangle/d = 3.6$ (со среднеквадратичным отклонением ± 0.1) в $\approx$1.6 раз превышает относительную глубину проникания $z/d = 2.2$ при одиночном ударе. Если в обобщенную формулу [12] $z/d = (\rho_p u^2/P)^{1/6}\sqrt{\rho_p/\rho_0}$ (ρ_p, ρ_0 — плотности ударника и преграды) в качестве сопротивления среды P подставить измеренную в [7] после опыта микротвердость материала преграды перед затормозившимся шариком $H \approx 2$ ГПа, то в условиях описываемых опытов получаем при одиночном ударе $z/d = 2.4$. Если же учесть оцененное выше уменьшение P в 6.6 раз, то $z/d = 3.3$. Полученные величины в пределах отклонения 10 % совпадают с измеренными относительными глубинами проникания при одиночном и множественном ударах соответственно.

Можно полагать, что рассматриваемый процесс множественного удара представляет собой пример проявления эффекта Ребиндера в благоприятных условиях [9]. В данном случае поликристаллический металл подвергается динамическому нагружению, что приводит к возникновению сложного напряженного состояния с высокими концентрациями интенсивных сдвиговых и растягивающих напряжений при многократных воздействиях со скоростями, обеспечивающими образование тонких слоев поверхностно-активной среды — расплава на стенках кратеров и на поверхности ударников.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика** взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. В 2 т. М.: Физматлит, 2002.
2. **Lin E. E., Mel'tsas V. Yu., Novikov S. A., et al.** Investigation of directed group acceleration of solid fragments by expanding explosive products // Proc. 16th Intern. Ballistics Symp. and Exhibition, San Francisco, CA, September 23–27, 1996. V. 2. P. 651–663.
3. **Хорев И. Е., Зелепугин С. А., Коняев А. А. и др.** Разрушение преград группой высокоскоростных тел // Докл. АН. 1999. Т. 369, № 4. С. 481–485.
4. **Иванов Г. И., Лин Э. Э., Мельцас В. Ю. и др.** Расчетно-экспериментальное исследование коллективного направленного разгона твердых фрагментов расширяющимися продуктами взрыва // Сб. докл. науч. конф. Волжского регион. центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. С. 432–439.
5. **Лин Э. Э., Мельцас В. Ю., Новиков С. А. и др.** О механизмах коллективного воздействия твердых тел на преграду // Сб. материалов III науч. конф. Волжского регион. центра РАРАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения» / Под ред. Р. И. Илькаева и др. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. Т. 2. С. 618–624.
6. **Лин Э. Э.** Импульсное нагружение объектов при сильном расширении продуктов взрыва твердых взрывчатых веществ (обзор) // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 3. С. 3–28.
7. **Илюшкина Н. Ю., Коломийцев В. Е., Лин Э. Э. и др.** Определение характера разрушения преград при множественном ударе твердых тел с умеренной скоростью // Тр. Междунар. конф. «VII Харитоновские тематические научные чтения» / Под ред. А. Л. Михайлова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005. С. 541–545.
8. **Илькаев Р. И., Лин Э. Э., Михайлов А. Л. и др.** О характере разрушения преград при множественном ударе твердых тел с умеренной скоростью // Докл. АН. 2006. Т. 409, № 2. С. 182–184.
9. **Ребиндер П. А., Щукин Е. Д.** Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физ. наук. 1972. Т. 108. Вып. 1. С. 3–42.
10. **Григорян С. С.** О природе «сверхглубокого» проникания твердых микрочастиц в твердые материалы // Докл. АН СССР. 1987. Т. 292, № 6. С. 1319–1322.
11. **Физические** величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
12. **Бадмаев Р. Л., Шамшев К. Н.** Гидродинамическая обобщенная модель проникания // Докл. АН. 2004. Т. 396, № 3. С. 343–344.

Поступила в редакцию 24/X 2006 г.,
в окончательном варианте — 26/XII 2006 г.