

05

О МЕХАНИЗМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАСТИЧНОГО УДАРНИКА С ХРУПКОЙ ТВЕРДОЙ СРЕДОЙ

*Е. Л. Зильбербранд, Н. А. Златин, А. А. Кожушко,
В. И. Положенко, Г. С. Пугачев, А. Б. Синани*

Рассмотрена задача об ударном взаимодействии пластичного металлического цилиндра с хрупкой твердой средой. Процесс взаимодействия проанализирован с позиций модели идеальной несжимаемой жидкости. Экспериментально установлено, что поведение хрупкой среды, лишенной прочности, может быть описано в рамках указанной модели. Показано также, что параметры процесса соударения с реальными хрупкими материалами (стеклом, керамикой) существенно отличаются от расчетных. Такое отличие связано с преодолением прочности хрупкой среды, конечным временем ее фрагментации.

В последние годы существенно возрос интерес к изучению поведения хрупких твердых материалов, в основном керамик и горных пород, при воздействии различных внешних факторов (силовых, температурных и т. д.). К настоящему времени достаточно полно рассмотрены вопросы, связанные с разрушением хрупких тел при сравнительно медленных (квазистатических) нагружениях. В первую очередь это относится к изучению кинетики роста хрупких трещин [1, 2], формированию зоны разрушения при различных видах напряженного состояния [3, 4] и, наконец, к измерению статической прочности хрупких тел [5, 6].

Представляет также несомненный интерес область динамических воздействий, например разрушение и дробление горных пород, обработка металлов высокотвердыми керамическими материалами и т. п. Следует заметить, что механизм разрушения хрупких тел при интенсивных ударных нагрузках пока не вполне ясен. Известно лишь ограниченное число работ [7-9], в которых рассмотрены только некоторые, как правило, частные вопросы ударного воздействия на хрупкие тела.

Таким образом, постановка настоящей работы была обусловлена отсутствием четких физических представлений о механизме поведения хрупкой твердой среды при интенсивном ударном нагружении, в частности при воздействии с высокой скоростью пластичных твердых тел.

В [10, 11] были подробно изучены основные закономерности процесса ударного взаимодействия пластичных ударников с полубесконечными преградами из пластичных металлов, таких, как свинец, алюминий, медь, железо и т. п. Из полученных результатов следует, что при скоростях удара v_0 , при которых давление на поверхности контакта взаимодействующих тел значительно превышает предел текучести вещества этих тел, процесс внедрения может быть хорошо описан, исходя из гидродинамических представлений, развитых М. А. Лаврентьевым [12]. Следует заметить, что для названных выше металлов гидродинамический подход может быть успешно использован при $v_0 > 500$ м/с.

Попытаемся применить аналогичный подход и к описанию процесса взаимодействия пластичного ударника с хрупкой средой, твердость которой намного превышает твердость материала ударника. Область скоростей взаимодействия

ограничим диапазоном 500—1000 м/с. Несмотря на кажущуюся парадоксальность постановки такой задачи, пластичный ударник из мягкого металла при скоростях удара в несколько сотен метров в секунду должен был бы взаимодействовать с высокотвердой преградой как с «жесткой стенкой», т. е. без внедрения (на практике внедрение ударника все же происходит, причем хрупкая преграда сильно фрагментируется в относительно большом объеме). Как установлено в наших исследованиях, на примере таких хрупких твердых преград, как стекло, ситалл и карбид кремния, при взаимодействии с пластичным ударником из железа армо разрушение всех этих материалов начинается с лицевой поверхности. Сначала возникает кольцевая трещина, окружающая зону контакта ударника с хрупким материалом. Затем вещество преграды довольно быстро (за несколько микросекунд) дробится. Поскольку скорость распространения разрушения (трещин) в названных выше хрупких средах относительно высока (в 2—3 раза выше скорости удара), то фрагментация преграды должна завершиться за сравнительно короткий период по отношению к полному времени взаимодействия. Таким образом, пластичный ударник в основном должен внедряться в сильно раздробленную, лишенную прочности среду, но с плотностью, близкой к монолиту.

Известно, что зона разрушения в хрупкой преграде при взаимодействии ее с ударником может распространиться на расстояние, значительно превышающее глубину внедрения ударяющего тела. Последнее обстоятельство не позволяет определять непосредственно после опыта глубину внедрения ударника (каверны) так, как это делалось в случае пластичных металлических преград. Следовательно, при рассмотрении процесса внедрения металлического тела в хрупкую среду необходимо прежде всего выбрать определенный аналог глубины проникания ударника. Если преграда представляет собой пластину, то ее толщину h в первом приближении можно рассматривать как элемент каверны заданной глубины h . В этом случае мерой воздействия пластины на ударник может служить степень его укорочения при проникании на глубину h . Тогда в соответствии с гидродинамической моделью процесса внедрения можно записать

$$h = \Delta l, \quad (1)$$

где h — толщина пластины, Δl — укорочение ударника, $\lambda = \sqrt{\rho_{\text{уд}}/\rho_{\text{пр}}}$, $\rho_{\text{уд}}$ и $\rho_{\text{пр}}$ — соответственно плотности ударника и преграды.

Если теперь левую и правую части (1) разделить на исходную длину ударника l , то получим

$$h/l = \lambda \Delta l/l, \quad (2)$$

откуда

$$\Delta l/l = h/\lambda l. \quad (3)$$

Величина $\Delta l/l$ есть не что иное, как относительное укорочение ϵ ударника при пробитии пластины толщиной h . Величина ϵ в нашем случае будет отражать сопротивление хрупкой среды прониканию пластичного ударника. Безразмерное выражение $h/\lambda l$, характеризующее прежде всего толщину хрупкой пластины, взаимодействующей с ударником, назовем приведенной толщиной h^* . В соответствии с гидродинамической моделью можно полагать, что зависимость относительного укорочения ϵ от h^* должна быть единой для материалов разной плотности и прочности, а также слабо изменяться от скорости

Материал	Плотность ρ , г/см ³	Скорость звука c_0 , м/с	Модуль Юнга E , кг/мм ²	Прочность при изгибе $\sigma_{\text{разр}}$, кг/мм ²	Микротвердость H , кг/мм ²
Стекло	2.4	5700	7470	5—10	490
Ситалл	2.4	6800	10900	18	780
Карбид кремния	3.0	10500	31700	18	2000

при скоростях, когда инерционные силы много больше прочности преграды и ударника.

В работе проведены эксперименты по пробитию пластин из стекла, ситалла и карбида кремния. Толщина образцов обычного силикатного стекла в опытах варьировалась от 3 до 25 мм. Пластины ситалла были толщиной 6 мм, а карбида кремния 10 мм. Удар по пластине хрупкого материала осуществлялся по нормали. Скорость удара во всех проведенных опытах составляла 800 ± 25 м/с. Ударник представлял собой цилиндр диаметром 8 и длиной 25 мм, изготовленный из отожженного железа армо, имевшего твердость по Бринеллю $H_B = 85$ кг/мм² и статический предел текучести $\sigma_s = 30$ кг/мм². Физико-механические характеристики исследованных хрупких материалов приведены в таблице.

Деформация ударника Δl определялась по его теньвым рентгеновским фотографиям в полете после пробития им хрупкой пластины. На рис. 1 в координатах $\epsilon - h^*$ приведены результаты опытов (кривая 1). Штриховая прямая 2 рассчитана по уравнению (3).

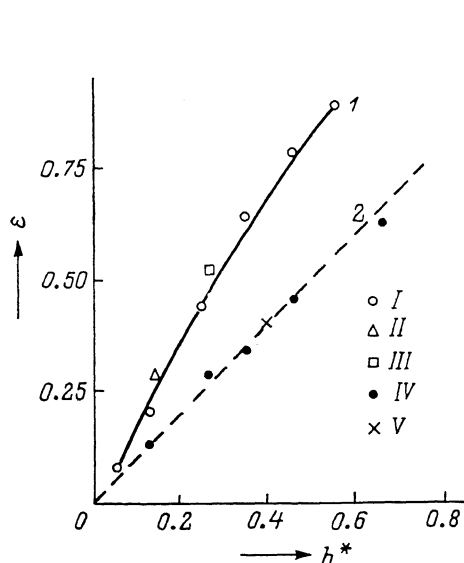


Рис. 1. Зависимость относительной деформации ударника ϵ от приведенной толщины h^* взаимодействующей с ним хрупкой пластины.

1 — экспериментальная зависимость для целой пластины; 2 — зависимость, рассчитанная по уравнению (3). I — силикатное стекло, II — ситалл, III — карбид кремния, IV — предварительно раздробленное силикатное стекло, V — предварительно раздробленное свинцовое стекло.

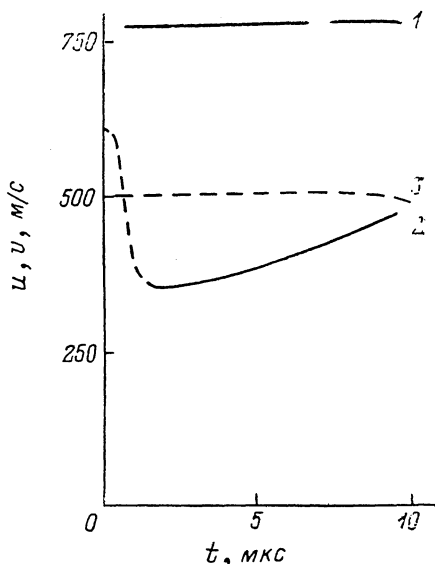


Рис. 2. Зависимость от времени.

1 — скорости тыльного среза железного ударника при взаимодействии со стеклянной пластиной толщиной 6 мм; 2 — скорости внедрения ударника в эту же стеклянную пластины; 3 — рассчитанные по формуле (4) скорости внедрения железного ударника в сплошную стеклянную среду.

Как видно из рис. 1, все исследованные материалы обнаруживают значительное отклонение (кривая 1) от зависимости (2), относящейся к гидродинамической модели внедрения. Можно предположить, что наблюдаемое различие связано с конечным временем фрагментирования (преодолением связности) сплошной среды, превращением ее в сыпучую среду, к которой применима гидродинамическая модель соударения.

Для оценки вклада прочности хрупкой среды в процесс деформирования пластичного ударника нами были проведены опыты по внедрению таких же ударников в предварительно раздробленные хрупкие среды, имевшие плотность первоначального, неразрушенного монолитного материала. Эти среды представляли собой плотно спрессованный мелкий порошок, который получался при воздействии интенсивной ударной волны на хрупкую твердую пластину, заключенную в прочную стальную оболочку. Плотность раздробленного таким способом вещества уменьшалась по сравнению с исходной не более чем на 5%. Прочность же полученного порошка можно было считать равной нулю.

Как видно из рис. 1, результаты опытов со всеми предварительно раздробленными пластинами силикатного стекла удовлетворяют зависимости (3), следующей из гидродинамической модели проникания. Сюда же легла точка, относящаяся к пластине раздробленного свинцового стекла ($\rho=4.7 \text{ г/см}^3$). Проведенные опыты убедительно показали, что отличие зависимости 1 от 2 прямо связано с предшествующим внедрению процессом разрушения и измельчения хрупкой твердой пластины.

Для того чтобы детально разобраться в особенностях взаимодействия пластичного тела с твердой хрупкой пластиной, нами были проведены на рентгеноимпульсной установке прямые опыты по изучению кинематики проникания ударника в целую и предварительно раздробленную пластину.

На рис. 2 приведена зависимость от времени t скорости внедрения u железного ударника в целую стеклянную пластину толщиной 6 мм (кривая 2). На этом же графике кривой 1 показана скорость хвостовой части ударника при ударе с начальной скоростью $v_0=800 \text{ м/с}$. Начальная штриховая часть кривой 2

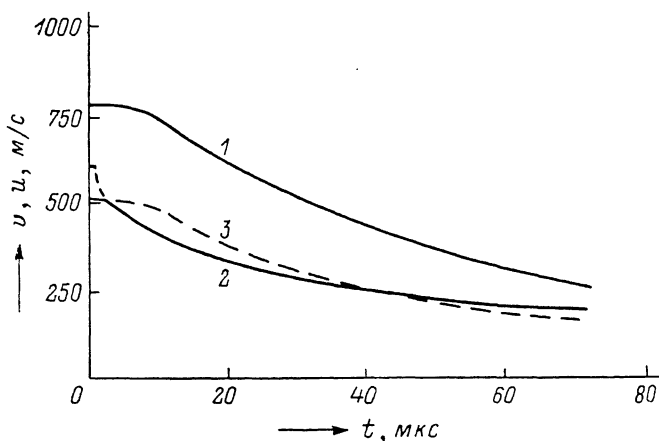


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, при взаимодействии железного ударника ($v_0=800 \text{ м/с}$) с предварительно раздробленной пластиной силикатного стекла толщиной 30 мм.

проведена, исходя из опытных данных и качественных представлений о нестационарной стадии соударения цилиндрического ударника с плоской пластиной [10]. Кривой 3 показано для рассматриваемого случая изменение скорости внедрения u , рассчитанной по гидродинамической модели с учетом только инерционного сопротивления,

$$u = v_0 / (1 + 1/\lambda). \quad (4)$$

Из анализа приведенных скоростных закономерностей следует, что практически на всем протяжении процесса взаимодействия, за исключением нестационарной стадии, скорость внедрения существенно ниже рассчитанной для гидродинамической модели. Следовательно, процесс дробления хрупкой преграды затянут во времени [13], несмотря на высокую скорость роста трещин в стекле. Эта временная задержка разрушения до полного исчерпания прочности осуществляется практически до конца прохождения пластины ударником. Более толстые пластины, судя по линейности зависимости 1 на рис. 1, имеют в соответствии с их толщиной большую временную задержку разрушения. Следует также подчеркнуть, что задержка, связанная с фрагментацией хрупкой среды, происходит примерно аналогичным образом в различных материалах. На это указывает близость экспериментальных данных для трех исследованных материалов.

На рис. 3 приведены аналогичные рис. 2 зависимости от времени скорости внедрения 2, скорости хвостовой части ударника 1 и рассчитанной по уравнению (4) скорости внедрения ударника 3, имевшего начальную скорость $v_0=800 \text{ м/с}$, при взаимодействии с предварительно раздробленной стеклянной пластиной толщиной 30 мм.

Как и следовало ожидать (рис. 1, кривая 2), скорость внедрения пластичного ударника в среду, лишенную прочности, практически на протяжении всего процесса взаимодействия совпала со скоростью, рассчитанной по гидродинамической модели.

Таким образом, пластины из хрупких высокотвердых материалов, несмотря на их быстрое разрушение при высокоскоростном ударе пластичным ударником, оказывают существенно большее сопротивление внедрению, чем это следует из гидродинамической теории. Показано, что это превышение целиком связано с преодолением прочности материала.

Поскольку развиваемые при ударе напряжения значительно превосходят прочности существующих хрупких высокотвердых материалов, можно полагать (и это подтверждается проведенными опытами), что все хрупкие материалы будут вести себя подобным образом.

Экспериментальные результаты, полученные в работе, и развитые на их основе представления о поведении высокотвердых хрупких сред при взаимодействии с пластичными ударяющими телами позволяют наметить пути дальнейших исследований. В частности, необходимо выяснить, каким образом состав и структура хрупких материалов, их прочность, твердость и вязкость разрушения влияют на сопротивление внедрению при ударном взаимодействии.

Список литературы

- [1] Кузьмин Е. А., Пух В. П. // Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 367—372.
- [2] Лагунов В. А., Мамбетов Ш. А. // ПМТФ. 1965. № 6. С. 96—99.
- [3] Финкель В. М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970.
- [4] Никифоровский В. С., Шемякин Е. И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979.
- [5] Пух В. П. Прочность и разрушение стекла. Л.: Наука, 1973.
- [6] Бартнев Г. М. Сверхпрочные и высокопрочные неорганические стекла. М.: Стройиздат, 1974.
- [7] Wilkins M. Ballistic Materials and Penetration Mechanics. Amsterdam—Oxford—New York: Els. Sci. Publ. Comp., 1980. P. 225—252.
- [8] Mauseless M., Goldsmith M., Virostek S., Finnegan S. // J. Appl. Mech. 1987. Vol. 54. N 6. P. 373—378.
- [9] Кожушко А. А., Рыкова И. И., Изотов А. Д., Лазарев В. Б. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1987. Т. 23. № 12. С. 2078—2083.
- [10] Златин Н. А. // Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М.: Наука, 1974. С. 194—240.
- [11] Perez E. // Sciences et techniques de l'armement. 1982. Vol. 56. N 1. P. 111—155.
- [12] Лаврентьев М. А. // УМН. 1957. Т. 12. № 4. С. 41—56.
- [13] Николаевский В. Н. Препринт ИПМ АН СССР. № 123. М., 1979.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
11 октября 1988 г.