

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЙ ПРИ УДАРЕ МЕТЕОРИТА ПО СТЕКЛУ

*В. М. Титов*

(Новосибирск)

Оценка воздействия метеоритов на прозрачные и хрупкие материалы может иметь значение при длительной эксплуатации в условиях космического пространства оптических систем, иллюминаторов, покрытий солнечных батарей и т. п. Ввиду хрупкости материала разрушения при ударе отличаются от разрушений в случае удара по пластичному металлу.

Экспонирование образцов в космосе показывает [1], что прежде всего важны оценки поверхностного разрушения, так как вероятность встречи с крупной частицей мала. Иногда все же представляет интерес и возможность разрушения образца в целом. Исследование воздействия частиц микронного размера на образцы стекла и кварца выполнено в [2] при массе частиц  $m \sim 10^{-10} - 10^{-12}$  г и скорости  $v = 2-14$  км/с. Для более крупных частиц в литературе имеются лишь данные отдельных опытов [3]. Поэтому целесообразно сопоставление с [2] достаточно полного экспериментального материала на крупных частицах для выяснения возможности масштабного моделирования и уточнения картины процесса.

Эксперименты данной работы поставлены в лабораторных условиях с помощью взрыва [4]. Использовались сферические стальные частицы, ускоренные до значений  $v = 5-12$  км/с при диаметре  $d = 0,7 - 2,3$  мм ( $m \sim 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$  г). Образцами служили стеклянные диски (оптический крон) с полированными поверхностями, которые крепились в металлической оправе прижимом по плоскости у края через кольца-амортизаторы; боковая поверхность оставалась свободной, диаметр дисков 115—255 мм при толщине  $\delta = 8-20$  мм. Для сравнения несколько экспериментов выполнено с образцами из кварца. Постановка опытов исключала воздействие продуктов взрыва на образец; требование попадания частицы в центр диска в экспериментах не ставилось. Отдельные опыты проведены с частицами размером  $d = 0,1 - 0,3$  мм ( $m \sim 3 \cdot 10^{-6} - 10^{-4}$  г), ускоряемыми в вакуумной камере до 5—13,5 км/с при точности определения конечного размера  $\pm 10\%$  и с частицами из стекла.

На фиг. 1 приведена фотография образца  $\varnothing 115$  мм,  $\delta = 15$  мм после опыта (частица  $d = 0,75$  мм,  $v = 10$  км/с). В месте удара имеется четко выраженная радиально-кольцевая структура трещин, которая остается неизменной при любой скорости удара. Диаметр этой зоны  $D \gg d$  и близок к наблюдаемым размерам при ударе по горным породам [5, 6], но на стекле выброс материала происходит только из центральной части размером  $D_1$  (на фотографии — внутри более светлого участка в центре), которая, возможно, даже несколько уменьшается с ростом скорости (см. таблицу). Скоростная киносъемка процесса удара (СФР-Л) показывает, что возникновение сетки трещин идет сразу же вслед за прохождением ударной волны, а затем происходит измельчение и выброс материала, сопровождаемые потерей прозрачности зоны удара. Раствор конуса разрушенного материала (в разрезе) около  $140-150^\circ$ , что близко к результатам [6]. Качественно по характеру разрушений с этим согласуются и данные [2]. В таблице приведены средние значения размеров  $D$ ,  $D_1$  (по 4—6 опытам) и глубина кратера  $p$  в стекле. Здесь же указаны



Ф и г. 1

(выборочно) данные [2] для удара разогнанных с помощью электростатического ускорителя частиц из полистирола ( $\rho = 1,04 \text{ г/см}^3$ ), алюминия и железа по стеклу (крон,  $\rho_1 = 2,3 \text{ г/см}^3$ ) и кварцу ( $\rho_1 = 2,2 \text{ г/см}^3$ ). Сопоставление их показывает, что размеры зоны поражения не изменяются подобно изменению размера частицы. В [2] размер частиц в  $5 \cdot 10^2 - 10^3$  раз меньше, чем у использованных в данной работе; безразмерная величина  $\bar{D} = D/d$  уменьшается при этом в 4—6 раз (см. таблицу). В пределах точности опыта данные при размере частиц  $d = 0,1 - 0,3 \text{ мм}$  согласуются с результатами для частиц  $d \sim 1 \text{ мм}$ . Таким образом, если допустить влияние фактора масштаба, то оно должно становиться заметным при  $d < 0,1 \text{ мм}$ .

Во всех опытах с крупными частицами ( $d \sim 1 \text{ мм}$ ) их размер на 2—2,5 порядка меньше диаметра образца, что исключает возможность влияния на поверхностное разрушение его конечных размеров. Это согласуется и с результатами киносъемки процесса удара.

Можно указать на две возможные причины расхождения результатов [2] и данной работы:

$v, \text{ км/с}$	$d, \text{ мм}$	$p, \text{ мм}$	$D_1, \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$	$\bar{D} = D/d$
10	0,75	3,2	$7,8 \pm 1$	$31,6 \pm 3$	42
7,2	0,83	3,1	$13,5 \pm 4$	$34,5 \pm 2$	41,5
5	0,9	2,6	$22 \pm 1,5$	$27 \pm 2$	30
4,46	Железо по стеклу [2]				4,8
3,05					4,8
8,34	Железо по кварцу [2]				8,2
6,42					7,5
9,57	Алюминий по стеклу [2]				5,73
7,79					3,6
10,1	Полистирол по стеклу (2)				3,75
7,0					3,4

а) влияние фактора масштаба опыта при  $10^{-3} \text{ мм} \leq d < 0,1 \text{ мм}$ . Но в стеклах неизвестна структура с таким характерным размером, тем более, что нижняя граница этого интервала близка к длине волны видимого света (в обеих группах экспериментов использовалось оптическое стекло, что предполагает однородность в этой области);

б) различие в механических свойствах материалов работы [2] и данной работы (хотя в каждом случае использованы оптические кроны). Этому очевидному предположению противоречат результаты настоящей работы по кварцу и обычному стеклу, где размеры поражения сопоставимы между собой и с основным материалом — стеклом типа К-8, хотя механические свойства заведомо различны.

Ответ может быть уточнен проведением экспериментов во всем интервале размеров на одном материале.

При  $v \sim 10 \text{ км/с}$  толщина металлической преграды, опасной с точки зрения сквозного пробивания, лежит в пределах  $5-10 d$  [7]. В случае стекла и кварца откольные явления на тыльной стороне диска становятся заметными при  $\delta \sim 20-25 d$ , а сквозное разрушение наступает при  $\delta \geq \geq 10 d$ . Эти результаты получены при исследовании удара частиц  $d \sim 1 \text{ мм}$  по дискам с  $\delta = 8; 15; 20 \text{ мм}$ .

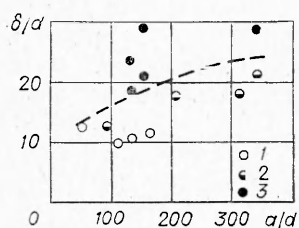
Ударная волна, расходящаяся от места удара, быстро переходит в упругую волну сжатия (ввиду наличия свободной поверхности присутствуют и поперечные волны). При выходе на свободную боковую поверхность происходит отражение волной разгрузки, при этом на свободной боковой поверхности могут возникнуть откольные явления (разрушения у краев, см. фиг. 1). Схождение волны в глубь образца приводит к росту (кумуляции) растягивающих напряжений, и в некоторой зоне их концентрация приводит к появлению сетки трещин, которые могут пронизывать всю толщину материала. Из физической модели явления следует, что размер зоны вторичного разрушения растет с ростом скорости частицы при постоянном  $d$ ; зона вторичного разрушения всегда находится на диаметре, проходящем через точку удара, но по другую сторону от центра диска; при уменьшении расстояния от точки удара до центра образца расстояние от центра до зоны вторичного разрушения также уменьшается, и в пределе эти зоны сливаются.

На образце, представленном на фиг. 1, видны все особенности описанного процесса хрупкого разрушения. Киносъемка процесса показала, что появление трещин вторичного разрушения соответствует скорости упругих волн  $4,7-5,2 \text{ км/с}$ , что находится в согласии с характеристиками материала. При разломе образца такая зона вторичного разрушения является одним из центров, по которому происходит раскалывание. Заметим, что разрушения от кумуляции волн разгрузки при динамическом нагружении известны давно (например, [8]).

Жесткая заделка образца в обойму из материала с акустическим импедансом, большим, чем у стекла, приводит к кумуляции волн сжатия; в этом случае также возникают вторичные разрушения. В опытах образец вставлялся в массивную стальную обойму, предварительно слегка нагретую.

При ударе под некоторым углом опасность хрупкого разрушения может возрасти. В экспериментах максимальные разрушения наблюдались при  $\alpha \sim 30-45^\circ$  (от нормали).

Таким образом, разрушение стеклянных образцов (иллюминаторов) в целом является сложным процессом, зависящим от ряда факторов. В известной экспериментальной области можно дать инженерную оценку конечного результата взаимодействия. На фиг. 2 приведена диаграмма типов разрушения для  $v = 7,2-7,4 \text{ км/с}$  в зависимости от отношения тол-



Ф и г. 2

щины образца  $\delta$  и диаметра  $a$  к размеру частицы (1 — полное разрушение; 2 — разрушение радиальными сквозными трещинами; 3 — наличие только вторичных разрушений). Предполагается слабая зависимость конечного разрушения от положения точки удара. Область, в которой образец остается не разрушенным полностью, лежит выше штриховой линии.

При оценке поверхностной метеоритной эрозии оптических материалов следует иметь в виду, что площадь поражения будет превышать площадь сечения частицы от  $0,3 \cdot 10^2$  (нижняя оценка по [2] как для легких, так и для тяжелых частиц) до  $10^3$  раз (верхняя оценка данной работы для тяжелых (железных) частиц). Эти данные получены в нижнем метеоритном интервале скоростей.

Целью работы являлось феноменологическое описание особенностей разрушения хрупких материалов при высокоскоростном ударе, поэтому в ней не ставится вопрос о сравнении с модельными теоретическими постановками (например, [9]).

В экспериментах принимал участие Г. В. Пряхин. Автор признателен Н. Н. Протасову, Т. Н. Назаровой за внимание к результатам.

Поступила 1 IX 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Zook H. A., Flaherty R. E., Kessler D. J. Meteoroid impacts on the Gemini windows. «Planetary and Space Science», 1970, vol. 18, N 7, p. 953.
2. Mandeville J. C. Étude de cratères formes sur des surfaces de verre par l'impact de micrometeoroides artificielles. Thèse. L'Université de Toulouse. France, 1972.
3. High Velocity Impact Phenomena. N. Y.— London, Acad. Press, 1970, p. 509. Рус. пер. Высокоскоростные ударные явления. М., «Мир», 1973, с. 511.
4. Титов В. М., Фадеев Ю. И., Титова Н. С. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом.— «Докл. АН СССР», 1968, т. 180, № 5, с. 1051.
5. Gault D. E., Heitowitz E. D. The partition of energy for hypervelocity impact craters formed in rock.— In: Proc. VI th Symp. Hypervelocity Impact. Vol. 2, pt 2. Cleveland, 1963, p. 419.
6. Титов В. М., Фадеев Ю. И., Швецов Г. А. Высокоскоростной удар по горным породам.— «Докл. АН СССР», 1970, т. 191, № 2, с. 298.
7. Титов В. М., Фадеев Ю. И. Сквозное пробивание при метеоритном ударе.— «Космические исследования», 1972, т. 10, № 4, с. 589.
8. Кольский Г. Волны напряжения в твердых телах. М., ИЛ, 1955, с. 174.
9. Черепанов Г. П. О точечном взрыве в идеально хрупком теле.— ПМТФ, 1969, № 4, с. 195.