

ПРОБИВАНИЕ ПРЕГРАД ПРИ УДАРЕ ЧАСТИЦ ИЗ СТЕКЛА, ИМИТИРУЮЩИХ КАМЕННЫЕ МЕТЕОРИТЫ

А. П. Аникиева, Л. А. Мержиевский, В. М. Титов

(Москва, Новосибирск)

В работах [1—3] рассмотрен ряд задач высокоскоростного удара, решаемых на основе экспериментальных данных, полученных при ударе стальных частиц по различным преградам. В данной работе эта информация анализируется применительно к условиям соударения, более точно моделирующим метеоритный удар (удар частиц из стекла, имитирующих каменные метеориты).

Для ускорения частиц из стекла сферической формы была разработана методика, основанная на известном принципе кумулятивного взрыва [4]. Уменьшение плотности газовой кумулятивной струи в сравнении с обычно применяемыми схемами [4] позволило обеспечить сохранение целостности частиц из стекла при разгоне до 8 км/с и более. Параметры использованных в работе частиц приведены в таблице (d — диаметр частицы, ρ_0 — ее плотность, v_0 — скорость удара). Точность измерения скорости во всех опытах не хуже 5%; ошибка в определении размеров частиц (после абляции при разгоне) не более 3—5%. В качестве материалов для преград использованы алюминиевые сплавы, медь, нержавеющая сталь.

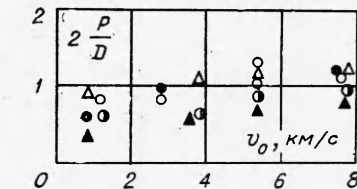
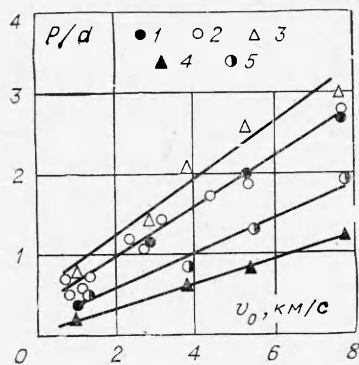
d , мм	5,2	5,2	3,5	3,5	2,47	2,47	2,4	2,35	1,56	1,45	1,3
ρ_0 , г/см ³	3,08	3,08	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,47	2,61	2,61	2,61
v_0 , км/с	0,8	2,4	1,35	3,2	1,0	3,1	3,8	4,4	2,8	5,4	7,8

Заметим, что отдельные данные по сквозному пробиванию при ударе частиц из стекла приведены в [1]; систематические данные в литературе отсутствуют, что связано, очевидно, с отсутствием методики ускорения.

В первой серии опытов использовались массивные мишени, в которых краевые эффекты не оказывают заметного влияния на конечный результат соударения. Такие мишени принято называть полубесконечными. Как экспериментально, так и теоретически кратерообразование в полубесконечной металлической мишени является наиболее изученным в области высокоскоростного удара. Описание физической схемы процесса и обобщение основных результатов различных методов можно найти, например, в [5, 6].

При ударе высокоскоростной частицы по полубесконечной металлической мишени образуется характерный кратер, объем которого вследствие пластического течения материала может существенно превосходить объем самой частицы. Отыскание закономерностей, связывающих параметры частицы и преграды с характеристиками кратера, важно как для изучения явления высокоскоростного соударения, так и для проведения оценок поверхностных повреждений (эрозии) конструкции. Применимость полученных данных для таких оценок способствует и то, что при варьировании различными исследователями размеров ударяющих частиц в весьма широком диапазоне (от сотых долей до десятков миллиметров) заметного масштабного эффекта не обнаружено (по крайней мере, при скоростях удара $v_0 > 3$ км/с).

Результаты экспериментов в виде зависимостей отношения глубины кратера P к диаметру частицы d от скорости удара приведены на фиг. 1, где 1 соответствует удару по мишени из Д-16АТ, 2 — АМГ-6, 3 — АД-1М, 4 — сталь Х18Н10Т, 5 — медь М1 (эти обозначения используются и далее на всех иллюстрациях). Сильное влияние на конечные параметры кратера оказывают прочностные характеристики материала мишени, величина



Ф и г. 2

Ф и г. 1

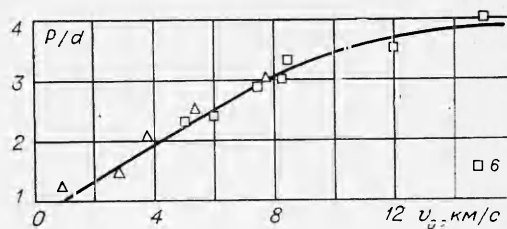
ны которых на поздних стадиях процесса сравнимы с инерционными силами, что подтверждается и полученными данными. Если глубины кратеров в мишенях из Д-16АТ и АМГ-6, очень близких по прочностным свойствам, описываются практически одной зависимостью, то при тех же скоростях удара величины P в менее прочном АД-1М существенно выше.

В инженерной практике используется ряд эмпирических и полуэмпирических соотношений, связывающих глубину кратера с параметрами частицы [5—9]. Это обусловлено сложностью проведения расчетов в рамках достаточно точных теоретических моделей. Сравнение полученных данных с этими зависимостями показало, что результаты удара частиц из стекла по мишеням из алюминиевых сплавов удовлетворительно описываются формулой Германа — Джонса [8], совпадение остальных экспериментальных данных с рассмотренными зависимостями отсутствует.

Обычно считают, что кратеры, образующиеся при высокоскоростном ударе в изотропных пластичных преградах, имеют форму, близкую к полусферической. В условиях поставленных экспериментов, когда скорости удара еще относительно невелики, эта закономерность может нарушаться. Характеристикой формы кратера является отношение глубины кратера к его диаметру D , измеренному на уровне начальной поверхности преграды. Величины этого отношения в зависимости от скорости удара показаны на фиг. 2. В мишенях из алюминиевых сплавов, пределы текучести которых существенно меньше соответствующих характеристик стали и меди, кратеры становятся полусферическими уже при скоростях удара ~ 1 км/с. В медных и стальных преградах практически во всем исследованном диапазоне скоростей $P < D/2$. Результаты отличаются от данных работы [5], где в алюминиевых преградах обнаружено аномальное отклонение формы кратера от полусферической. В [5] это интерпретируется как следствие определенной ориентации зерен в прокатанных пластинах, используемых в качестве преград. Сопоставление всех данных показывает, что в первом приближении в рассматриваемом диапазоне скоростей удара форма кратера определяется отношением плотностей частицы и преграды. Отклонение этого отношения от единицы приводит к соответствующим отклонениям формы кратера от полусферической.

Кратер в мишени образуется в результате развития ударно-волновых и инерционных процессов, сопровождающих взаимодействие ударяющей частицы и преграды. Параметры этих процессов определяются в первую очередь скоростью частицы и отношением ρ_0/ρ_1 (ρ_1 — плотность материала преграды).

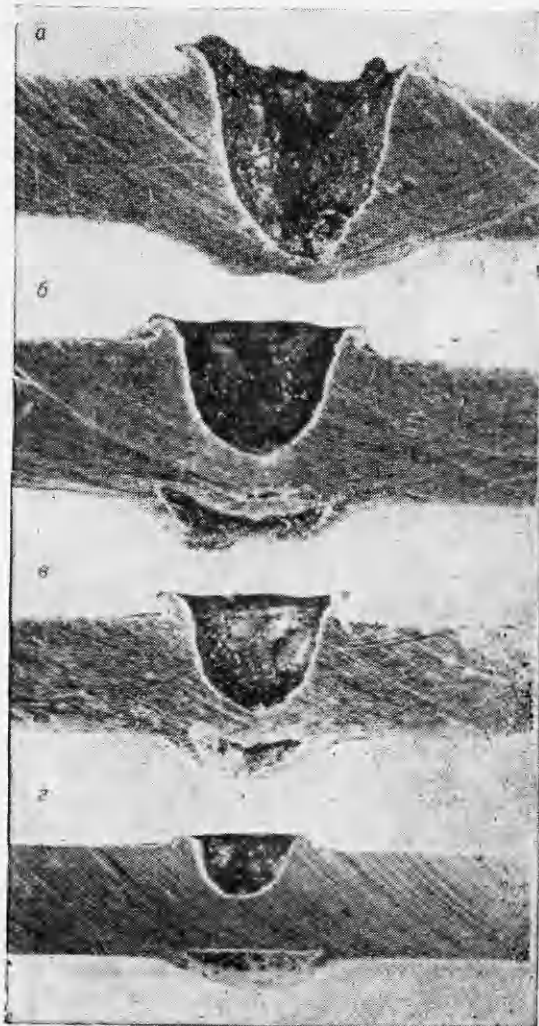
На фиг. 3 проводится сравнение глубины кратеров, образованных ударом стеклянных и пирексовых (6 — данные работы [10]) частиц по преградам из мягкого алюминиевого сплава и чистого алюминия. Результаты практически совпадают в перекрывающемся диапазоне скоростей. Таким образом, полученные результаты с достаточным основанием могут быть экстраполированы до скоростей удара $v_0 \approx 15$ км/с. Размеры пирексовых



Ф и г. 3

частиц составляли доли миллиметра, что более чем на порядок меньше размеров стеклянных частиц, т. е. слабое влияние масштабного фактора подтверждается и в этих опытах.

Во второй серии опытов использовались преграды, толщины которых сравнимы с размерами образующихся в них кратеров. На результат взаимодействия высокоскоростной частицы с такими преградами, называемыми преградами конечной толщины, большое влияние оказывают волновые процессы, сопровождающие выход ударной волны на тыльную свободную поверхность. При этом поверхность деформируется; зачастую происходит откол наружного слоя преграды (фиг. 4, а — преграда толщиной $\delta = 7$ мм, $v_0 = 4,4$ км/с, $d = 2,35$ мм; б — $\delta = 7$ мм, $v_0 = 7,8$ км/с, $d = 1,3$ мм; в — $\delta = 5,5$ мм, $v_0 = 5,4$ км/с, $d = 1,45$ мм, все преграды из АД-1М; г — $\delta = 5,3$ мм, $v_0 = 7,8$ км/с, $d = 1,3$ мм, преграда из М1). Под предельной толщиной δ_0 , пробиваемой высокоскоростной частицей, подразумевается максимальная толщина преграды, при которой наступает сквозное разруше-



Ф и г. 4

ние, выражающееся хотя бы системой разгерметизирующих трещин [1]. Предельная толщина не является столь же точно фиксируемой величиной, как глубина каверны P , и в опытах определяется подбором толщины преграды. Основные факторы, приводящие к предельному разрушению, разобраны в [1]. Это либо смыкание кратера с откольной полостью и разрыв отколовшегося слоя, либо разрывы перемычки между дном кратера и тыльной поверхностью мишени при ее пластическом деформировании.

Разнообразие наблюдающихся типов предельного пробивания обуславливается различными комбинациями указанных факторов. При пробивании преград из алюминиевых сплавов стальными частицами откольные явления выражены слабо. Напротив, при ударе стеклянных частиц предельная толщина во многом определяется именно откольными эффектами. Это различие легко объяснить, предположив, что амплитуда ударной волны, выходящей на тыльную свободную поверхность преграды при предельном пробивании стеклянной частицей больше, чем при ударе стальной частицей. Максимальную интенсивность ударной волны, образующейся в начальный момент соударения, можно оценить, полагая соударение плоским, а ударные адиабаты материалов имеющими вид

$$u_s = a + bu_p,$$

где u_s — скорость ударной волны; u_p — массовая скорость; a, b — постоянные величины. Для исследуемых материалов с хорошей точностью можно положить

$$u_p \simeq \lambda v_0,$$

где $\lambda < 1$ — постоянная для фиксированной пары материалов величина. Тогда отношение начальных давлений на фронте ударной волны, распространяющейся в преграде при ударе с одинаковой скоростью частицами разной плотности (ρ_{01} и ρ_{02} соответственно) имеет вид

$$(1) \quad \frac{p_{01}}{p_{02}} \simeq \frac{\lambda_1 (a_1 + \lambda_1 b_1 v_0)}{\lambda_2 (a_2 + \lambda_2 b_2 v_0)}$$

(λ_1, λ_2 и a_1, a_2, b_1, b_2 — соответствующие значения λ, a, b). Для описания затухания амплитуды ударной волны воспользуемся известным законом для сильных ударных волн [11]. В данном случае его можно записать в виде

$$p = p_0 / (r/d)^v,$$

где p — давление на фронте ударной волны; p_0 — начальное значение p ; r — расстояние, пройденное волной; $v = \text{const}$. Отношение давлений при выходе ударных волн на поверхность в случае предельного пробивания с учетом (1) равно

$$\frac{p_1}{p_2} \simeq \frac{\lambda_1 (a_1 + \lambda_1 b_1 v_0)}{\lambda_2 (a_2 + \lambda_2 b_2 v_0)} \left(\frac{\delta_{02}}{\delta_{01}} \right)^v,$$

где δ_{01}, δ_{02} — соответствующие значения предельных толщин. Воспользовавшись формулой для зависимости предельной толщины преграды от параметров соударения из [1], получим

$$\delta_{02}/\delta_{01} \simeq (\rho_{02}/\rho_{01})^{1/3},$$

откуда

$$\frac{p_1}{p_2} \simeq \frac{\lambda_1 (a_1 + \lambda_1 b_1 v_0)}{\lambda_2 (a_2 + \lambda_2 b_2 v_0)} \left(\frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} \right)^{v/3}.$$

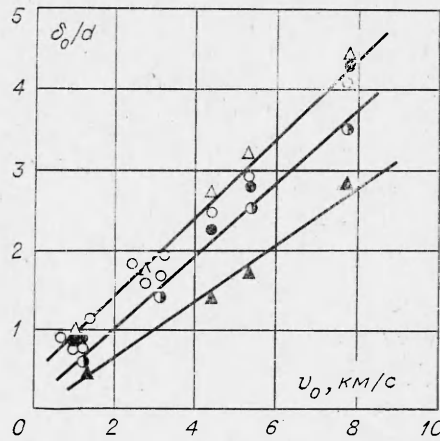
Сравним теперь величины давлений для случая удара стеклянных (индекс 1) и стальных (индекс 2) шаров по преградам из алюминиевых сплавов. В этом случае $\lambda_1 \approx 0,47$, $\lambda_2 \approx 0,63$, $a_1 = 5$ км/с, $b_1 = 1,35$, $a_2 = 3,8$ км/с, $b_2 = 1,58$, для сферического случая $\nu = 3$. В диапазоне скоростей 1—10 км/с $p_1/p_2 \approx 2,25-2$. Конечно, значение $\nu = 3$ в рассматриваемом случае является завышенным, однако даже в случае $\nu = 2$ в указанном диапазоне скоростей $p_1/p_2 \approx 1,55-1,35$, т. е. и такая явно заниженная оценка показывает превышение p_1 над p_2 .

Данные о зависимости предельной толщины от скорости удара приведены на фиг. 5. На примере преград из алюминиевых сплавов еще раз демонстрируется слабая зависимость величины δ_0 от прочности преграды.

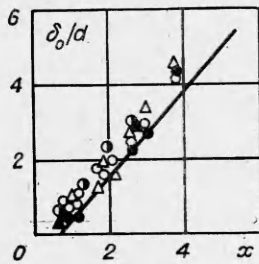
Несмотря на то, что механизм предельного пробивания может существенным образом меняться в зависимости от соотношения свойств материалов преграды и частицы, удается найти единое приближенное описание всех известных экспериментальных данных [1, 2]. В самом простом виде предлагаемая в этих работах зависимость предельной толщины от параметров частицы и преграды имеет вид

$$(2) \quad \delta_0/d \approx 1,15 [(\rho_0 v_0^2/\rho_1)^{1/3} - 0,7] \cos^{2/3} \alpha,$$

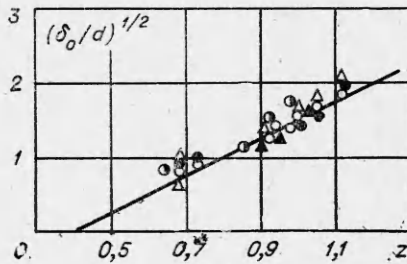
где α — угол отклонения траектории частицы от нормали к преграде. Соотношение (2), как и еще целый ряд аналогичных соотношений, строится в предположении о существовании функциональной связи величины предельной толщины с удельной кинетической энергией частицы, являющейся естественным развитием гипотезы о приближенной пропорциональности объема кратера в полубесконечной мишени кинетической энергии ударяющегося тела. Формула не содержит каких-либо прочностных характеристик материала пластины; слабое влияние прочности на величину δ_0 отмечалось неоднократно. Применимость (2) в случае удара частиц из стекла иллюстрируется на фиг. 6, где полученные экспериментальные данные приведены в координатах δ_0/d , $x = (\rho_0 v_0^2/\rho_1)^{1/3}$; сплошная линия соответствует (2). Отклонение экспериментальных данных от зависимости (2) не превышает точности формулы относительно данных, по которым эта формула строилась.



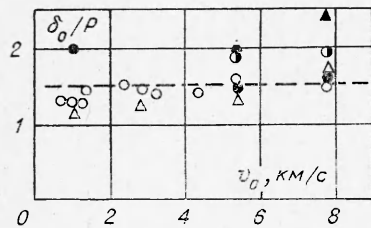
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Ф и г. 8

В работе [2] приведена форма зависимости предельной толщины от условий соударения, в которой в качестве определяющего явления параметра выбрано отношение удельной кинетической энергии частицы к начальному уровню давления в преграде, $z = (\rho_0 v_0^2 / \rho_1 u_s u_p)^{1/3}$. Зависимость описывает все известные авторам экспериментальные результаты, но применимость ее сейчас ограничена скоростями удара $v_0 \approx 15$ км/с. Вопрос о возможности экстраполяции этой зависимости остается открытым. Данные, полученные при ударе частицами из стекла, хорошо описываются этой зависимостью. Сравнение проводится на фиг. 7 (прямая соответствует зависимости из [2]).

Иногда для оценок предельной толщины используют соотношение

$$(3) \quad \delta_0 \approx kP,$$

где $k = \text{const}$. Было показано, что в случае удара стальных частиц по преградам из алюминия и его сплавов такая приближенная связь действительно существует. Для удара частицами из стекла по алюминиевым сплавам в исследованном диапазоне скоростей (3) выполняется уже при $v_0 > 1$ км/с (фиг. 8), при этом $k \approx 1,5$. Для преград из других материалов k не является постоянной величиной и оценки с помощью (3) несправедливы.

Авторы выражают благодарность В. П. Урушкину за совместное проведение экспериментов с частицами из стекла.

Поступила 18 VI 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Титов В. М., Фадеев Ю. И. Сквозное пробивание при метеоритном ударе.— «Космические исследования», 1972, т. 10, вып. 4, с. 589.
2. Мерзиевский Л. А., Фадеев Ю. И. Разрушение тонкостенного трубопровода, заполненного жидкостью, при ударах метеоритов.— «Космические исследования», 1973, т. 11, вып. 6, с. 944.
3. Мерзиевский Л. А., Титов В. М. Пробивание пластин при высокоскоростном ударе.— ПМТФ, 1975, № 5, с. 102.
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. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар.— В кн.: Физика быстропротекающих процессов. Т. 2. М., «Мир», 1971.
6. High Velocity Impact Phenomena. N. Y.— L. Acad. Press., 1970. Рус. пер. Высокоскоростные ударные явления. М., «Мир», 1973.
7. Фукс. Явления при ударе.— «Ракет. техн. и космонавтика», 1963, т. 1, № 9.
8. Whipple F. L. On meteoroids and penetration.— «J. Astronaut. Sci.», 1969, vol. 10, N 3, p. 92.
9. Беляков П. В., Витман Ф. Ф., Златин И. А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. II.— ЖТФ, 1963, т. 3, № 8, с. 990.
10. Sawle D. R. Hypervelocity impact in thin sheets and semi-infinite targets at 15 km/s. AIAA Paper, N 69—378.
11. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М., Гостехиздат, 1967.