

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРА ТЕЛА С ВЫСОКОЙ СКОРОСТЬЮ В ЛЕГКИЙ ПОРИСТЫЙ МАТЕРИАЛ

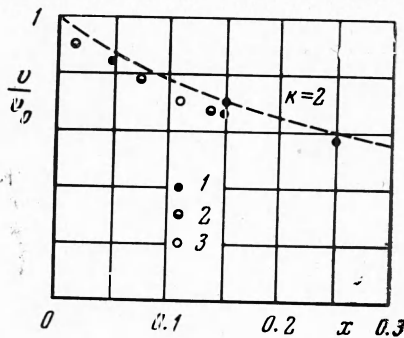
Г. В. Прякин, В. М. Титов

(Новосибирск)

В литературе [1] не рассматривается удар с высокой скоростью (5—10 км/сек) в случае, когда плотность среды («мишени») много меньше плотности ударяющегося тела. Ниже излагаются результаты экспериментального исследования особенностей такого процесса.

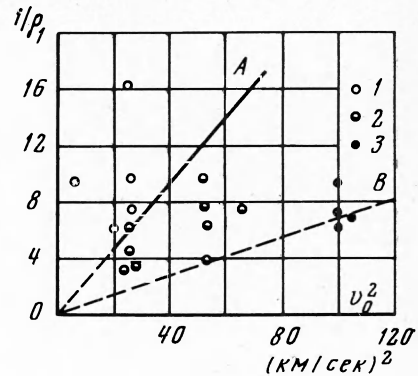
В опытах применялись стальные шары размером порядка нескольких миллиметров, ускоренные до скорости $v_0 = 5-10$ км/сек зарядами ВВ [2]. Мишени представляли собой блоки пенопласта, пенополиуретана (поропласт), пористой резины, волокнистых материалов. Плотность указанных материалов лежит в пределах 0.06—0.35 г/см³. Размер пор и расстояние между ними, как правило, существенно меньше диаметра шара d_0 .

При всех скоростях удара в опытах начальная стадия внедрения представляет собой гиперзвуковой процесс, так как скорость распространения звуковых колебаний в пористых средах мала [3].



Фиг. 1

Фиг. 1. Торможение стального шара в материале; $d_0 = 3.35$ мм, $v_0 = (5.1 \pm 0.15)$ км/сек
1 — пенопласт $\rho_1 = 0.06$ г/см³; 2 — пенопласт $\rho_1 = 0.11$ г/см³; 3 — пористая резина $\rho_1 = 0.15$ г/см³



Фиг. 2

Фиг. 2. Разрушение шара из стали; точки 1 определяют область сохранения целостности, точки 2 — область разрушения тела, точки 3 — область течения материала тела

Эксперименты выявили несколько основных режимов процесса внедрения тела.

1. Напряжения, возникающие в теле, меньше предела прочности материала тела. Очевидно, что это возможно при достаточно малых значениях $\rho_1 v_0^3$ (здесь ρ_1 — плотность материала мишени). Примером может служить такой эксперимент: при $\rho_1 = 0.11$ г/см³ (пенопласт), $v_0 = 5.1$ км/сек шар $d_0 = 3.35$ мм не разрушается, пройдя до остановки расстояние $p = 780$ мм $\approx 230 d_0$. Конечная масса тела составляет 0.85 начальной, что позволяет считать размеры в начале внедрения неизменными. Сопоставим процесс внедрения с обтеканием шара сверхзвуковым потоком газа. В этом случае сила, действующая на шар

$$F = -k(v)\rho_1 r_0^2 v^2 \quad (1)$$

где ρ_1 , v — плотность и скорость потока, r_0 — радиус шара. Заметим, что $k(v) = \text{const} = 1.44$ для значений числа Маха $M \geq 4$ [4]. Из (1) при $v = v_0$ для $s = 0$ (s — путь тела) получим закон торможения

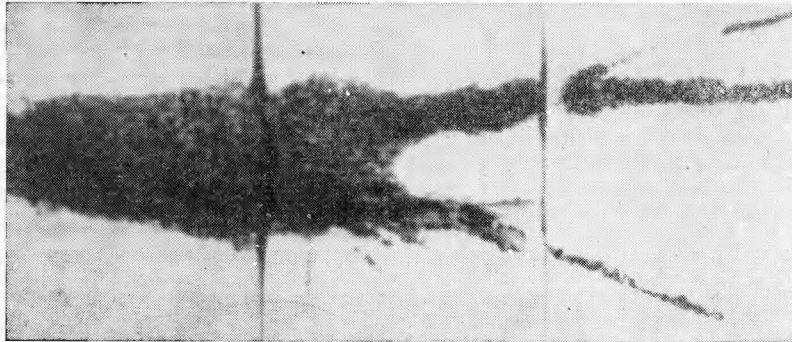
$$v = v_0 \exp\left(\frac{-k\rho_1 r_0^2 s}{m}\right), \quad \text{или} \quad v = v_0 e^{-kx} \left(s' = \frac{s}{dI_0}, \quad x = \frac{3}{2\pi} \frac{\rho_1}{\rho_0} s'\right) \quad (2)$$

Здесь m — масса шара, ρ_0 — плотность материала тела.

Регистрация движения тела в материале мишени выполнялась с помощью фоторегистра СФР. Между слоями материала в 20—30 мм оставлялись зазоры 1—1.5 мм. Развертка процесса внедрения позволяет фиксировать прохождение тела через зазор

и определить среднюю скорость тела на данном участке. Измерения проводились до $s = 50 \div 60 d_0$. Результаты приведены на фиг. 1. Сравнение с кривой $f(x) = e^{-2x}$ показывает, что для исследованных материалов $k \approx 2$. По порядку величины это близко к данным [4] для газа (отличие до полутора раз связано, очевидно, с изменением характера обтекания).

В работе не исследовалось торможение вблизи точки остановки. Имеются указания [5] на резкое изменение закона торможения и коэффициента сопротивления при малых скоростях движения в случае удара в песок ($v_0 = 0.7$ км/сек).



Фиг. 3. Удар в поропласт (пенополиуретан); $d_0 = 1.7$ мм,
 $v_0 = 7.35$ км/сек, $\rho_1 = 0.28$ г/см³

В рассмотренном механизме внедрения максимальная глубина проникания соответствует наибольшей скорости, при которой разрушение еще отсутствует. Реальный процесс усложняется изменением размера тела вследствие уноса массы с поверхности.

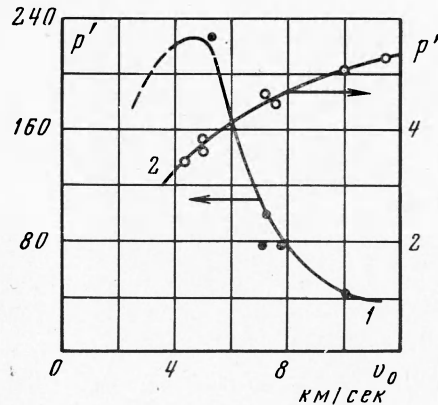
Условие разрушения для шара, движущегося с гиперзвуковой скоростью v в газе плотности ρ_1 имеет вид [6]

$$\rho_1 v^2 \geq \sigma \quad (\sigma \sim 3.5) \quad (3)$$

Здесь σ — величина предела прочности материала тела на растяжение или сдвиг (в зависимости от свойств материала). Сравнение процессов торможения позволяет предположить аналогичный вид условия разрушения при движении в легкой пористой среде. Тогда при неизменных прочностных характеристиках используемых в экспериментах тел в плоскости переменных v_0^2 , $1/\rho_1$ граница разрушения (сохранения целостности) изобразится лучом $c_1 = \rho_1 v_0^2$.

2. Напряжения, возникающие в теле, больше предела прочности материала тела. На фиг. 2 в плоскости переменных v_0^2 , $1/\rho_1$, $(\text{г/см}^3)^{-1}$ приведены результаты экспериментов, выполненных в работе. Область 1 соответствует сохранению целостности тела (точки с индексом 1), 2 — разрушению (индекс 2). Напомним, что здесь тела — стальные шары. Граница разрушения близка, очевидно, к ОА. Диаграмма (фиг. 2) весьма приближена, но позволяет дать предварительную оценку характера взаимодействия при известном материале тела. В практически интересных случаях выбор материала тела ограничен: метеориты — каменные и железоникелевые; тела, ускоренные в лабораторных условиях, — из стали, дюралюминия, иногда полимерных материалов.

Характер разрушения сильно зависит от величины $\rho_1 v_0^2$ и материала тела. Может наблюдаться скалывание материала у поверхности и образование коротких осколочных треков (стекло при малой скорости удара); возможно разрушение при пластической



Фиг. 4. Глубина проникания в мишень в зависимости от скорости удара стального шара; 1 — пенопласт
 $\rho_1 = 0.11$ г/см³; 2 — дюралюмин

деформации тела (в переходном режиме здесь может наблюдаться деформация и без разрушения). Для шаров из закаленной стали при $v_0 \sim 6-8$ км/сек типичным будет дробление на осколки (фиг. 3); число их растет с увеличением скорости. Рентгеноимпульсная съемка регистрирует перед разрушением заметную деформацию в поперечном направлении (в диск); это приводит к более сильному торможению, чем при отсутствии разрушения. На разрушение и расхождение осколков требуется конечное время, поэтому участок входа — широкий цилиндрический канал (фиг. 3).

3. Напряжения, возникающие в теле, много больше предела прочности материала тела. При этом наступает течение материала. В предельном случае прочностью его можно пренебречь, уподобив жидкости. Такие модели хорошо изучены при высокоскоростном ударе по металлу [1] и в теории кумуляции [7]. Следы от осколков исчезают, и каверна от удара приобретает вид относительно широкой выемки.

В грубом приближении можно допустить, что переход к такому режиму (зона 3 на фиг. 2) также происходит вдоль некоторого луча $c_2 = \rho_1 v_0^2$ на фиг. 2 (пунктир OB); определение точной границы здесь невозможно, что показывает и эксперимент. Заметим, что OB фиксирует начало изменения характера разрушения тела по остаточному эффекту — каверне, а не развитое течение материала тела. Аналогию с высокоскоростным ударом по плотному материалу можно провести, естественно, при заметно больших значениях $\rho_1 v_0^2$. Нижнюю оценку глубины проникания (по порядку величины) в этом случае можно дать, воспользовавшись соотношениями теории кумуляции, как это часто делается в работах по удару в плотные материалы [1].

Рассмотренные в п. 1—3 особенности процесса приводят к уменьшению глубины проникания в легкий материал с ростом скорости удара при $v_0 \sim 5-10$ км/сек. Для пенопласта ($\rho_1 = 0.11$ г/см³) на фиг. 4 дана зависимость $p' = p/d_0 = f(v_0)$ (кривая 1). Для сравнения приведены данные для удара в дюралюминий (кривая 2). В дальнейшем с ростом скорости v_0 глубина проникания p начнет возрастать из-за увеличения остаточной деформации материала вследствие инерционного движения.

Физическую аналогию рассмотренному «аномальному» ходу кривой $p' = f(v_0)$ можно наблюдать в случае удара по металлу с относительно малой скоростью тела из весьма прочного материала [8].

Авторы признательны Ю. И. Фадеенко за обсуждение и В. П. Урушкину за помощь в экспериментах.

Поступила 19 II 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоскоростной удар (библиографический указатель). Ин-т гидродинамики СО АН СССР, Новосибирск, 1967.
2. Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Титова Н. С. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом. Докл. АН СССР, 1968, т. 180, № 5.
3. Din Yu Hsieh, Plesset M. S. On the propagation of sound in a liquid containing gas bubbles. Phys. Fluids, 1967, vol. 4, No. 8.
4. Hodges A. J. The drag coefficient of very high velocity spheres. J. Aeronaut. Sci., 1957, vol. 24, No. 10.
5. Allen W. A., Mayfield E. B., Morrison K. L. Dynamics of a projectile penetrating sand. J. Appl. Phys., 1957, vol. 28, No. 3.
6. Фадеенко Ю. И. Разрушение метеорных тел в атмосфере. Физика горения и взрыва, 1967, № 2.
7. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принципы его работы. Усп. матем. н., 1957, т. 12, вып. 4 (76).
8. Беляков Л. В., Витман Ф. Ф., Златин Н. А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании. ПМТФ, 1963, т. 33, вып. 8.