

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ К ПРОЦЕССУ СОУДАРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Н. А. Златин, А. А. Кожушко, И. И. Рыкова

(Ленинград)

В общем случае соударения твердых тел сопротивление преграды внедрению ударяющего тела имеет аддитивный характер. Оно складывается из собственного сопротивления материала преграды деформированию и инерционного сопротивления [1—3]. При скоростях взаимодействия до  $\sim 10^2$  м/с влияние инерционного сопротивления пренебрежимо мало. В этих условиях можно считать, что сопротивление внедрению определяется характеристиками прочности или пластичности материала преграды. Для пластичных, в частности металлических, материалов такой характеристикой является динамическая твердость, величина которой слабо зависит от скорости нагружения [4].

С увеличением скорости соударения в сопротивлении внедрению существенно возрастает роль сил инерционного сопротивления. В области скоростей взаимодействия  $10^3 - 10^4$  м/с эти силы становятся определяющими. В этих условиях влиянием прочностных характеристик взаимодействующих тел можно пренебречь и применить для описания процесса модель соударения двух струй идеальной несжимаемой жидкости (гидродинамическую модель) [5]. Согласно модели, давление на поверхности контакта взаимодействующих тел, определяющее параметры процесса, задается уравнением Бернулли.

Естественно, что для каждой пары соударяющихся тел существует область скоростей взаимодействия, в которой силы прочностного и инерционного сопротивления оказываются соизмеримыми. Граница этой области, определяющая применимость гидродинамической модели, должна задаваться прочностными характеристиками взаимодействующих тел [6]. Здесь при внедрении ударяющего тела в стационарном режиме (например, длинный тонкий стержень, внедряющийся в полубесконечную преграду) условие равенства давлений на поверхности контакта взаимодействующих тел задается уравнением [1, 2, 6]

$$\frac{1}{2} \rho_1 u^2 + H_1 = \frac{1}{2} \rho_2 (v - u)^2 + \sigma_2, \quad (1)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности материалов преграды и ударника;  $H_1$  — динамическая твердость преграды;  $\sigma_2$  — динамический предел текучести ударника;  $v$  — скорость ударяющего тела в свободном полете;  $u$  — скорость внедрения в преграду. Выражение (1) можно представить в виде

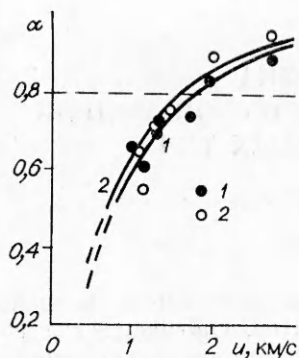
$$v/u - 1 = 1/\alpha\lambda, \quad \lambda = \sqrt{\rho_2/\rho_1}, \quad (2)$$

а при  $H_1 \gg \sigma_2$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{H_1}{\rho_1 u^2}}}. \quad (3)$$

Формула (2) отличается от следующего из гидродинамической модели соотношения скоростей  $v/u$  коэффициентом  $\alpha$ . Он характеризует степень отклонения параметров процесса, обусловленного влиянием сопротивления деформированию, от расчета по гидродинамической модели.

Зная скорости  $v$  и  $u$ , из (2) можно вычислить коэффициент  $\alpha$  и по его величине из (3) — оценить  $H_1$  при данной скорости внедрения. Полученные данные позволяют определить границу применимости гидродинамической модели к процессу внедрения в преграду с заданной динамической твердостью.



Достаточно надежная экспериментальная регистрация отклонения от гидродинамической модели достигается при  $\alpha \leq 0,8$  [6]. Этому условию соответствует определенная для каждого материала преграды скорость внедрения

$$u_n \approx \sqrt{H_1/\rho_1}, \quad (4)$$

которую можно принять как границу применимости гидродинамической теории для преграды из материала заданной прочности.

В настоящей работе исследовалось влияние сопротивления деформированию на параметры процесса внедрения медного ударника в преграды из алюминиевого сплава В-95 (твердость по Бринелю  $H_B = 1800$  МПа, плотность  $\rho_1 = 2,8$  г/см<sup>3</sup>) и титанового сплава ВТ-6 ( $H_B = 3000$  МПа,  $\rho_1 = 4,5$  г/см<sup>3</sup>). Сочетание высокой твердости этих материалов с относительно низкой плотностью обуславливает такое сочетание инерционного и прочностного сопротивления внедрению, при котором возможна регистрация влияния динамической твердости этих материалов при скоростях соударения  $\sim 10^3$  м/с.

На основании данных измерения скорости ударника в свободном полете  $v$  и скорости его внедрения  $u$  в исследуемый материал по (2) рассчитывался коэффициент  $\alpha$ . На рисунке приведены экспериментальные зависимости  $\alpha(u)$  для В-95 (1) и ВТ-6 (2). Значения  $u_n$ , определяющие границы применимости гидродинамической теории (при  $\alpha = 0,8$ ), как видно из рисунка, составляют 1,85 км/с для В-95 и 1,6 км/с для ВТ-6 (медный ударник с  $v \sim 3$  км/с).

Результат обработки экспериментальных данных в предположении  $H_1 \gg \sigma_2$  [7] свидетельствует о том, что они соответствуют для В-95 и ВТ-6  $H_1 = 2650$  и 3550 МПа. Указанные величины превышают статические значения твердости, что согласуется с общей закономерностью роста сопротивления металлов деформированию с увеличением скорости нагружения [4].

Таким образом, при внедрении ударяющего тела в преграды из алюминиевого и титанового сплавов высокой твердости со скоростями  $\sim 10^3$  м/с зарегистрированы отклонения параметров от гидродинамической модели, выходящие за пределы экспериментальной погрешности. Такие отклонения обусловлены существенным влиянием сопротивления материала преграды деформированию, которое в условиях опытов оказывается соизмеримым с инерционным сопротивлением внедрению.

Сопротивление деформированию сплавов В-95 и ВТ-6 превышает их статическую твердость и находится на уровне динамической твердости, регистрируемой при скоростях соударения  $10^2 - 10^3$  м/с.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеевский В. П. ФГВ, 1966, 2, 2, 99.
2. Tate A. J. Mech. Phys. Solids, 1967, 15, 6, 387.
3. Златин Н. А. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях.— М.: Наука, 1974.
4. Витман Ф. Ф., Степанов В. А. // Некоторые проблемы прочности твердого тела.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959.
5. Лаврентьев М. А. УМН, 1957, 12, 4 (76), 41.
6. Златин И. А., Кожушко А. А. ЖТФ, 1982, 52, 2, 330.
7. Баум Ф. А. и др. // Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича.— М.: Наука, 1975.

Поступила в редакцию 18/III 1988