

УДК 531.58

О ВНЕДРЕНИИ ЖЕСТКОГО СНАРЯДА В СТАЛЬНУЮ ПРЕГРАДУ ПРИ УМЕРЕННЫХ СКОРОСТЯХ УДАРА

В. К. Голубев, В. А. Медведкин

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Представлены результаты экспериментального исследования влияния скорости удара и формы головной части жесткого снаряда калибром 20 мм на глубину его внедрения в толстую преграду из мягкой низкоуглеродистой стали при скоростях удара до 600 м/с. Для снарядов с конической и полусферической формой головных частей получены экспериментальные зависимости глубины внедрения от скорости удара. Показано, что при внедрении на глубину 1–2 калибра сопротивление внедрению не зависит от формы головной части и характеризуется средним значением напряжения, равным 2,98 ГПа.

Процессы внедрения и проникания снарядов в различные преграды исследуются достаточно широко как экспериментальными, так и численными методами [1]. Однако в связи с большим разнообразием ситуаций отдельные частные вопросы требуют дальнейшего изучения либо уточнения. Задачей данной работы является исследование влияния скорости удара и формы головной части жесткого снаряда калибром 20 мм на процесс внедрения в толстую стальную преграду при относительно низких (до 600 м/с) скоростях удара.

Исследуемые преграды представляли собой массивные диски диаметром 160 мм и толщиной 70 мм, изготовленные из низкоуглеродистой стали Ст3 в состоянии поставки. На лицевую поверхность преград накаткой наносили квадратную сетку с шагом 5 мм. В результате контрольного определения для стандартных механических свойств материала преграды получены следующие средние значения: предел текучести $\sigma_{0,2} = 203$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 458$ МПа, относительное удлинение при разрыве $\delta_5 = 24,5$ %. Для твердости по Бринеллю H_B получено среднее значение 1,26 ГПа.

Нагружение преград осуществлялось ударом снарядов двух типов — с конической (угол раствора 90°) и полусферической формой головной части. Снаряды диаметром 20 мм ($r = 10$ мм) и длиной 80 мм, изготовленные из стали ШХ15, имели твердость по Роквеллу $H_{RC} = 60 \div 64$ кг/мм². Разгон снарядов выполнялся с помощью пороховой пушки соответствующего калибра. Для определения скорости снарядов использовались индуктивные датчики-хронографы.

В результате проведенных опытов не отмечено какого-либо формоизменения снарядов. На рис. 1 представлены фотографии снарядов с полусферической и конической формой головной части после удара со скоростями 425 м/с (рис. 1, *слева*) и 410 м/с (рис. 1, *справа*). Фрагменты поверхности двух преград с образовавшимися кратерами показаны на рис. 2. Рис. 2, *а* соответствует удару снаряда с конической формой головной части ($v = 410$ м/с), рис. 2, *б* — с полусферической ($v = 425$ м/с). Из экспериментов следует, что при примерно равных скоростях удара при образовании кратера от снаряда с конической головной частью несколько бо́льшая часть материала идет на формирование буртика. Диаметр его кромки и высота больше, чем для снаряда с полусферической головной частью. Происходит образование радиальных трещин, идущих от кратера. Чем выше скорость удара, тем значительнее растрескивание. Для полусферической головной части растрескивание



Рис. 1

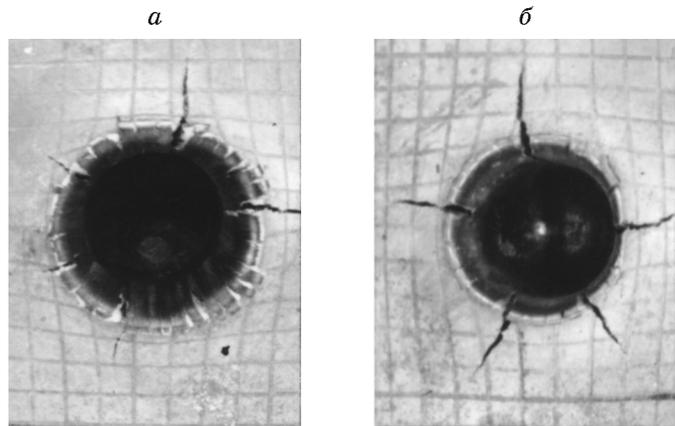


Рис. 2

проявляется в большей степени. Деформация лицевой поверхности преграды, определяемая по искривлению накатанной мерной сетки, заметна на расстояниях до одного калибра от кромки образовавшегося буртика. В донной части кратера полусферической формы, образованного при минимальной скорости удара, заметны следы поверхностной мерной сетки. Это можно объяснить сцеплением головной части ударника и материала преграды в процессе внедрения. Зафиксированное здесь же наличие цветов побежалости указывает на деформационный разогрев порядка 300 °С.

Результаты экспериментов приведены в табл. 1 (m — масса снаряда, v — скорость снаряда, h — глубина кратера относительно исходной лицевой поверхности, h_b — глубина кратера относительно верхней части (кромки) образовавшегося буртика, d_b — диаметр кромки буртика). На рис. 3 представлены полученные экспериментальные зависимости $h(E)$ ($E = mv^2/2$ — кинетическая энергия снарядов) для снарядов с конической (треугольники) и полусферической (квадраты) формой головной части. Сплошными линиями показаны линейные регрессионные зависимости вида $h = a + bE$, определенные методом наименьших квадратов. Значения коэффициентов a и b , их стандартные отклонения s_a и s_b , стандартные отклонения точек относительно регрессии s_h и значения коэффициентов корреляции R приведены в табл. 2.

Таблица 1

Форма головной части снаряда	m , г	v , м/с	h , мм	h_b , мм	d_b , мм
Конус	179,3	390	22	28	30,5
	179,1	410	24	30	31,0
	179,5	530	34	40	35,0
	179,3	540	36	42	35,5
Полусфера	187,1	364	19,5	23,5	26,8
	186,7	425	23,0	28,0	29,0
	188,3	435	24,0	30,0	29,4
	187,3	524	33,5	38,5	32,0

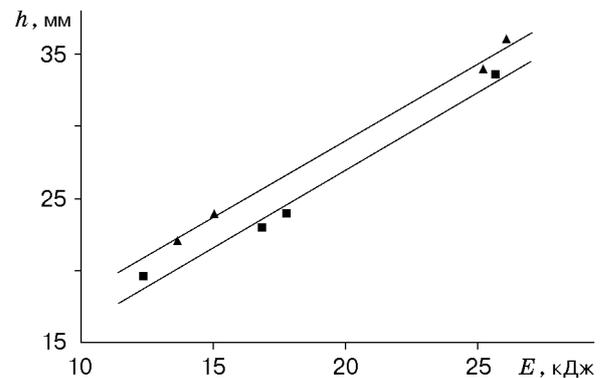


Рис. 3

Таблица 2

Форма головной части снаряда	a , мм	s_a , мм	b , мм/кДж	s_b , мм/кДж	s_h , мм	R
Конус	7,682	1,027	1,065	0,049	0,563	0,998
Полусфера	5,468	1,632	1,073	0,087	0,832	0,994

Результаты регрессионного анализа указывают на то, что в диапазоне скоростей удара 300–600 м/с и глубин внедрения 1–2 калибра зависимости h от E являются линейными. Таким образом, при движении снаряда на глубинах от одного до двух калибров на него действует постоянная сила сопротивления $F = dE/dh$. Ее значение фактически не зависит от формы головной части и равно 935 кН (932 кН для конической головной части и 938 кН для полусферической). Соответствующее значение среднего по площади сечения напряжения сопротивления $\sigma_r = F/(\pi r^2)$ составило 2,98 ГПа.

Для оценок напряжения сопротивления внедрению жесткого снаряда в металлические преграды при скоростях удара до 1000 м/с широко используется полученная в работе [2] на основании обработки экспериментальных данных формула

$$\sigma_r = H_d + k\rho v^2,$$

где H_d — динамическая твердость материала, экспериментально определяемая при скоростях удара около 10 м/с; ρ — его плотность; k — коэффициент формы головной части снаряда. По мнению авторов [2], формула применима для металлических преград различной прочности начиная с некоторой критической скорости, которая определяется с помощью соотношения $v_k = \sqrt{H_B/(k\rho)}$. В настоящей работе для обоих рассматриваемых типов головных частей $k = 0,5$ и, следовательно, $v_k = 567$ м/с. Таким образом, в соответствии с данными [2] в исследуемом диапазоне умеренных скоростей не следует ожидать существенного влияния скорости удара на сопротивление внедрению жесткого снаряда в преграду из стали Ст3. Это позволяет определить сопротивление внедрению, ограничившись минимальным количеством опытов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аптуков В. Н.** Проникание: механические аспекты и математическое моделирование (обзор) // Пробл. прочности. 1990. № 2. С. 60–68.
2. **Витман Ф. Ф., Степанов В. А.** Влияние скорости деформирования на сопротивление деформирования металлов при скоростях удара $10^2 \div 10^3$ м/с // Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 205–221.

*Поступила в редакцию 15/VI 1998 г.,
в окончательном варианте — 28/X 1998 г.*