

05

Экспериментальное исследование разрушения преград с различными физико-механическими характеристиками при ударном нагружении

© В.М. Захаров, В.В. Буркин

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета,
634050 Томск, Россия
e-mail: zakharov_vm@list.ru

Поступило в Редакцию 16 ноября 2017 г.

В окончательной редакции 28 сентября 2018 г.

Принято к публикации 12 февраля 2019 г.

Экспериментально исследовано разрушение однородных преград, имеющих различные физико-механические характеристики, при взаимодействии с высокопрочными стальными ударниками. Сравнимость результатов для разных типов преград обеспечивалась на основе весовой эквивалентности — равенства веса по толщине для единицы площади преграды. Начальная скорость взаимодействия изменялась в диапазоне 50–800 м/с. Двухракурсной рентгеноимпульсной съемкой осуществлялась регистрация движения ударника после пробития преграды. Обработкой рентгенограмм получены значения запреградной скорости ударника в зависимости от его начальных скоростей соударения. проанализированы особенности разрушения преград и их защитные свойства путем построения диаграмм пробития.

DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47793.2564

Введение

Повышение защитных свойств преград является важнейшей научно-практической задачей. В конструкциях изделий, подвергаемых интенсивным ударным нагрузкам, активно используются различные материалы с повышенными прочностными характеристиками и различные типы преград, например, однородные, слоистые. Сравнительный анализ однородных и слоистых преград представлен в работе [1].

Исследование закономерностей разрушения преград конечной толщины, разнообразие типов разрушения привели к необходимости более детального анализа деформирования тыльной поверхности преград. Характер разрушения тыльной поверхности преград в случае их пробития удлиненными стержневыми ударниками, разрушающимися в процессе взаимодействия, обсуждался в работе [2].

Целью настоящей работы является исследование характера разрушения различных видов преград при высокоскоростном ударном взаимодействии с высокопрочными недеформируемыми ударниками.

Методика эксперимента

Для оценки стойкости преград к сквозному разрушению и прогнозирования параметров запреградного потока важны характеристики предельной пластичности материала преград при соударении. Для подобного анализа полезными оказываются измерения осевой деформации S_b тыльной поверхности преграды (максимально-

го выпучивания вдоль оси удара). С этой целью была разработана методика построения диаграмм пробития, на которых строятся графики зависимостей глубины проникания ударника L_b (пути ударника) в преграду толщиной b и осевой деформации S_b от скорости взаимодействия. Расстояние между этими графиками показывает изменение толщины преграды в процессе взаимодействия по мере возрастания скорости удара.

Исследование особенностей разрушения преград конечной толщины в диапазоне относительно низких скоростей взаимодействия, где ударники не разрушаются, проводилось в экспериментах с высокопрочным стальным ударником 6.1Б-32 по преградам различной прочности и плотности. Ударник имеет следующие параметры: диаметр $d_0 = 6.1$ мм, оживальная головная часть высотой $h = 11.2$ мм, масса ударника 5.5 г.

Метание ударников производилось из пороховой баллистической установки калибром 8 мм, скорость метания (соударения) V_0 изменялась от 50 до 800 м/с. Скорость ударников определялась индукционными измерителями.

В первой серии опытов использовались пластичные стальные преграды из Ст3. Цель этих опытов — отработка методики построения диаграмм пробития преград.

Вторая серия опытов проводилась с эквивалентными преградами из стали средней твердости Ст,69^Ш, прочного алюминиевого сплава Ал-102 и прочного титанового сплава ВТ-6. Толщина преград подбиралась из условия равенства веса, т.е. веса единицы площади всех преград были равны. Прочностные характеристики исследуемых материалов подбирались близкими к максимальным для своих типов сплавов. Такие условия экви-

Таблица 1. Характеристика исследуемых преград

Тип материала	Механические характеристики
Стальной лист обыкновенного качества Ст3	HB (120–140)
Стальной лист средней твердости Ст.,69°Ш	HB (321–363)
Алюминиевый высокопрочный сплав Ал-102	$\rho = 2.75 \text{ g/cm}^3$; HB 143
Титановый сплав ВТ-6. Листовой прокат	$\rho = 4.45 \text{ g/cm}^3$; HB 302

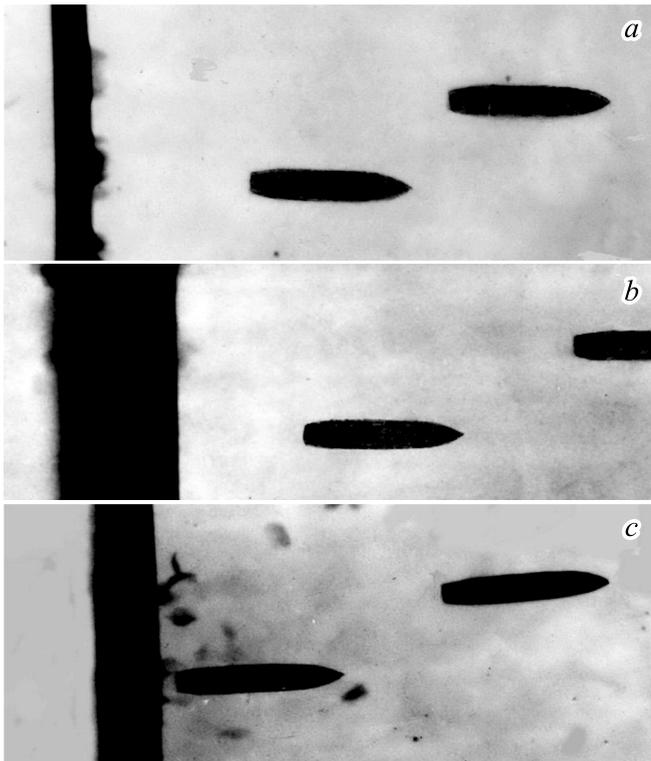


Рис. 1. Двухэкспозиционные рентгенограммы движения ударника 6.1Б-32 за преградой: *a* — преграда Ст.,69°Ш, $V_0 = 408 \text{ m/s}$, $\Delta\tau = 200 \mu\text{s}$, $V_s = 208 \text{ m/s}$; *b* — преграда Ал-102, $V_0 = 410 \text{ m/s}$, $\Delta\tau = 400 \mu\text{s}$, $V_s = 125 \text{ m/s}$; *c* — преграда ВТ-6, $V_0 = 547 \text{ m/s}$, $\Delta\tau = 130 \mu\text{s}$, $V_s = 387 \text{ m/s}$.

валентности позволяют провести сравнительный анализ особенностей разрушения и стойкости всех преград. Описание преград приведено в табл. 1, где обозначены HB — твердость по Бринеллю, ρ — плотность материала преграды.

Регистрация процесса взаимодействия ударника с преградой осуществлялась методом двухэкспозиционной съемки на одну кассету двумя рентгеноимпульсными аппаратами РИНА-ЗБ/6 с задержкой $\Delta\tau$ времени срабатывания между ними. Обработкой рентгенограмм определялась скорость запреградного потока V_s . Типичные рентгенограммы представлены на рис. 1.

Опыты проводились в условиях нормального удара, когда вектор скорости совпадает с продольной осью ударника и нормалью к поверхности преграды.

Характер разрушения преград

На рис. 2–5 эти эксперименты для всех преград представлены в виде обобщенных диаграмм пробития, где наряду с зависимостями $L_b(V_0)$ и $S_b(V_0)$ даны зависимости запреградной скорости $V_s(V_0)$. Предварительный анализ для преграды ВТ-6 был представлен в работе [3].

На диаграммах отмечены характерные координаты: — абсциссы, описывающие состояние тыльной поверхности преграды: НПК (FPD) — начало образования пластического купола (Formation of the Plastic Dome); РПК

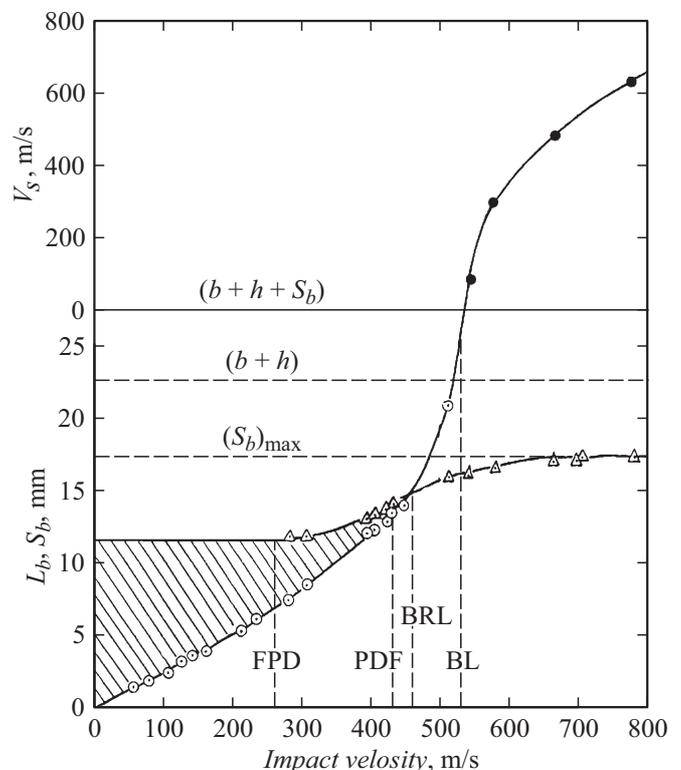


Рис. 2. Диаграмма пробития преграды Ст3 ударником 6.1Б-32, сечение преграды заштриховано; графическими знаками обозначены экспериментальные данные для зависимостей: \circ — $L_b(V_0)$; Δ — $S_b(V_0)$; \bullet — $V_s(V_0)$.

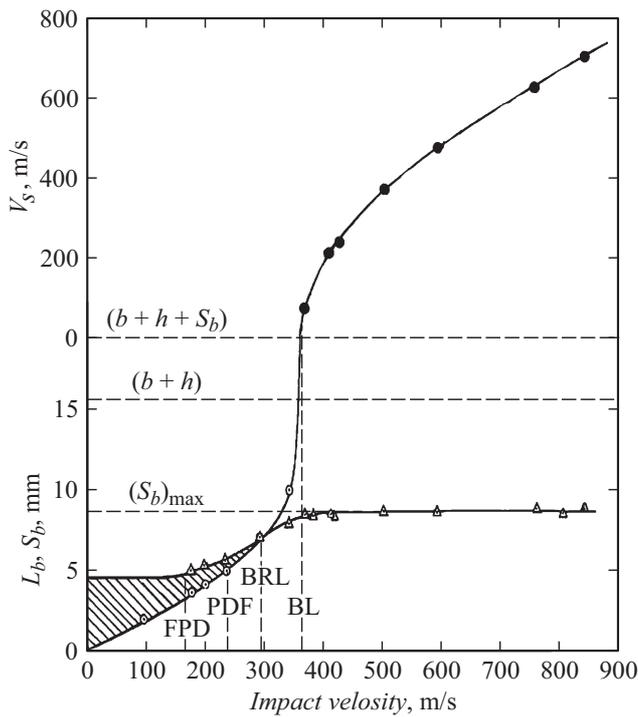


Рис. 3. Диаграмма пробития стальной преграды Ст.,69“Ш ударником 6.1Б-32, сечение преграды заштриховано; обозначения кривых — те же.

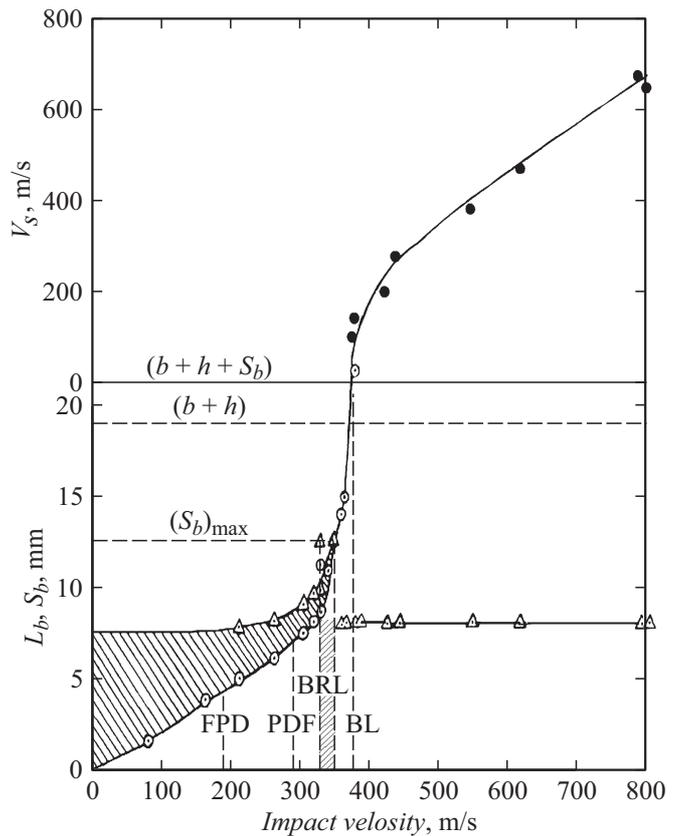


Рис. 5. Диаграмма пробития преграды из титанового сплава ВТ-6 ударником 6.1Б-32, сечение преграды и зона „срезания пробки“ заштрихованы; обозначения кривых — те же.

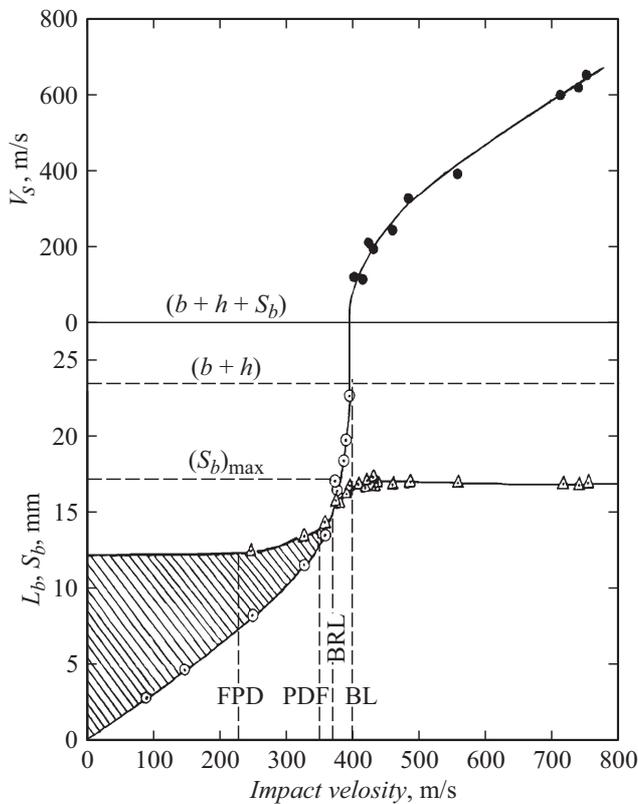


Рис. 4. Диаграмма пробития преграды из алюминиевого сплава Ал-102 ударником 6.1Б-32, сечение преграды заштриховано; обозначения кривых — те же.

(PDF) — разрыв (появление первых трещин) пластического купола (Plastic Dome Fracture); ПТП (BRL) — предел тыльной прочности — нарушение сплошности преграды (Back Resistance Limit); ПСП (BL) — предел сквозного пробития (Ballistic Limit);

— ординаты, характеризующие путь ударника в преграде и деформацию ее тыльной поверхности: $(S_b)_{max}$ — максимальная деформация тыльной поверхности преграды; $(b+h)$ и $(b+h+S_b)$ — выход ударника из пластического купола (h — высота головной части ударника).

Ордината $(b+h+S_b)$ соответствует моменту ПСП, когда ударник может удерживаться в преграде лишь силами трения по его цилиндрической поверхности и при дальнейшем незначительном повышении скорости встречи ударник пробивает преграду, имея запреградную скорость V_s .

Взаимоположение кривых $L_b(V_0)$ и $S_b(V_0)$ позволяет более точно определять моменты образования и разрыва тыльного купола и собственно момент сквозного разрушения ПСП. Анализ зависимости $S_b(V_0)$ дает возможность оценить размеры срезаемой пробки, зоны „прокола“ и „откола“.

Таблица 2. Анализ диаграмм пробития, ударник 6.1Б-32

Параметр диаграммы	Материал преграды			
	Ст3	Ст.,69°Ш	Ал-102	ВТ-6
b , mm	11.6	4.4	12.3	7.6
b/d_0	1.9	0.7	2.0	1.2
V_{BL} , m/s	530	360	400	375
Тип разрушения преграды	Прокол	Прокол, прогиб преграды	Прокол с частичной локализацией деформации на заключительной стадии пробития	Лицевые отколы, прокол, пробка
$(L_b)_{FPD}/b$	0.63	0.64	0.63	0.62
$(V_0)_{FPD}/V_{BL}$	0.50	0.47	0.56	0.53
$(L_b)_{PDF}/b$	1.16	1.14	1.02	0.95
$[(V_0)_{PDF} - (V_0)_{FPD}]/V_{BL}$	0.31	0.18	0.30	0.24
$[V_{BL} - (V_0)_{PDF}]/V_{BL}$	0.19	0.36	0.13	0.23
$(S_b)_{max}/d_0$	0.95	0.70	0.80	0.80
$(S_b)_{max}/b$	0.50	0.98	0.40	0.64
$(V_0 - V_s)/V_0$ ($V_0 = 800$ m/s)	0.19	0.16	0.15	0.17

Анализ разрушения преград

Сравнительный анализ диаграмм пробития всех испытанных преград представлен в табл. 2.

Для этих преград установлены следующие различия в характере разрушения: пластичные преграды Ст3, Ст.,69°Ш, Ал-102 разрушаются по типу прокола, тонкая преграда Ст.,69°Ш при пробитии испытывает деформацию прогиба; для прочной преграды из алюминиевого сплава Ал-102 на заключительной стадии пробития наблюдается срезание небольшой пробки.

Для прочной титановой преграды ВТ-6 в начале внедрения ударника имеет место прокол, сопровождающийся выкалыванием лицевой поверхности преграды, а затем срезается пробка. Для момента ПСП глубина лицевых отколов составила 4.0 mm.

Далее происходит локализация деформации и адиабатический сдвиг части материала, т.е. образование пробки, и дальнейшее продвижение в преграду с выталкиванием пробки (измерения пробки после опыта дали то же значение $(7.6 - 4.0)$ mm = 3.6 mm).

Интересно отметить, что пластическое деформирование тыльной поверхности всех преград начинается при одинаковой глубине внедрения ударника относительно толщины преграды — $((L_b)_{FPD}/b) = 0.63$. При этом характерная скорость удара $(V_0)_{FPD}$ для разных преград меняется слабо и составляет для преград толщиной более калибра в среднем $0.53V_{BL}$; лишь для тонкой преграды Ст.,69°Ш, где $(b/d_0) = 0.7$, эта характеристика несколько ниже — $(V_0)_{FPD} = 0.47V_{BL}$.

На момент РПК — разрыва пластического купола — путь ударника в пластичных преградах превышает тол-

щину преграды (до $1.16b$), а для прочной преграды ВТ-6 из-за образования пробки это значение меньше и составляет $(L_b)_{PDF} = 0.95b$.

Развитие пластического купола в исследуемых преградах $[(V_0)_{PDF} - (V_0)_{FPD}]$ показывает зависимость от толщины преграды, изменяясь от $0.18V_{BL}$ для $(b/d_0) = 0.7$ до $0.31V_{BL}$ для $(b/d_0) \approx 2.0$. Максимальная деформация тыльной поверхности $(S_b)_{max}/d_0$ имеет наибольшее значение, равно 0.95, для малопрочной стальной преграды Ст3 и уменьшается по мере увеличения прочности материала преграды.

Измерения запреградной скорости показали, что потеря начальной скорости в процессе пробития различных преград имеет близкие значения и составляет $(0.15 - 0.19)V_0$ для скорости стрелкового диапазона.

Повышение прочности преграды приводит к изменению вида ее разрушения: вместо интенсивного пластического деформирования значительных объемов материала преграды („прокол“) определяющей становится локализация пластической деформации в узкой области материала преграды в форме цилиндрической поверхности, что при повышении давления на фронте волны сжатия приводит к более раннему адиабатическому сдвигу материала по этой поверхности — „срезанию пробки“.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ разрушения преград с различными физико-механическими характеристиками с помощью диаграмм пробития позволяет установить общие закономерности процесса и сделать количе-

ственные оценки, характеризующие особенности деформирования и разрушения преград. По существу, диаграммы пробития — это экспериментально-графический метод оценки предельной пластичности преград в условиях их пробития и определения ПСП.

В целом эти данные позволяют оценить стойкость преград к ударному нагружению и их защитные свойства. Установленная на основе обширных экспериментов информация является особенно актуальной, так как получена на реальных конструкционных материалах в практически важном диапазоне скоростей взаимодействия.

Финансирование работы

В работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № 9.9036.2017/8.9.

Список литературы

- [1] *Захаров В.М., Табаченко А.Н., Афанасьева С.А.* // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 7. С. 1003–1007.
DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44669.2106
[*Zakharov V.M., Tabachenko A.N., Afanasieva S.A.* // Techn. Phys. 2017. Vol. 62. N 7. P. 1019–1023.
DOI: 10.1134/S1063784217070283]
- [2] *Захаров В.М., Хорев И.Е.* В сб.: *Фундаментальные основы баллистического проектирования*. Т. 2. СПб.: БГТУ „Военмех“, 2010. С. 93–96.
- [3] *Захаров В.М., Хорев И.Е.* В сб.: *Актуальные проблемы прочности*. 53 Международная научная конференция. Часть 1. Витебск: УО ВГТУ, 2012. С. 212–214.