

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ С ОБЛИЦОВКОЙ ПРИ ИХ СОУДАРЕНИИ С ПРЕГРАДОЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ СОУДАРЕНИЯ

К. Тан, Ц. Ван, С. Чэнь, Н. Чжоу*

Нанджунгский университет науки и техники, 210094 Нанджунг, Китай

* Нанкинский колледж лесной полиции, 210023 Нанкин, Китай

E-mails: tkui2014@sina.com, wjx@njjust.edu.cn, m18851199809@163.com, nudge@163.com

Представлены результаты экспериментального, теоретического и численного исследований процессов соударения стержней с преградой и проникания в нее. Изучено соударение с полубесконечной преградой и проникание в нее однородных стержней и стержней с облицовкой. Скорость соударения стержней с преградой изменялась в диапазоне $0,9 \div 3,3$ км/с. Исследовалось влияние материала облицовки, скорости соударения и начальной кинетической энергии стержней на процессы разрушения стержней и преграды. Установлено, что при одной и той же начальной кинетической энергии стержни с облицовкой проникают в преграду на большую глубину, чем однородные стержни. Показано, что при фиксированном значении отношения радиуса облицовки к радиусу сердечника целесообразно использовать стержни с меньшей плотностью материала облицовки и прочностью, обеспечивающей необходимую жесткость на изгиб.

Ключевые слова: стержни с облицовкой, вольфрам марки 93W, алюминиевый сплав марки 1060Al, титановый сплав марки TC4, сталь марки 4340, преграда, соударение, проникание, разрушение.

DOI: 10.15372/PMTF20190417

Введение. Для того чтобы увеличить жесткость на изгиб и предотвратить разрушение тонких цилиндрических снарядов на стадии их ускорения и подлета к мишени, предложено добавлять к ним облицовку [1–7]. Результаты экспериментального исследования баллистических свойств стержней из тяжелого титанового сплава с облицовкой из углепластика и со стальной облицовкой приведены в работе [3]. В [2] представлены результаты численного и экспериментального исследования проникания длинных стержней из тяжелого вольфрама с облицовкой из углепластика в наклонную стальную пластину. В [4] приведены результаты численного и экспериментального исследования проникания таких же стержней с облицовкой из стали марки 4130 и установлено, что наибольшая глубина проникания стержней в преграду имеет место в том случае, если отношение радиуса стержня к радиусу облицовки равно 0,6. В работе [5] изучено разрушение стержней с облицовкой при проникании их в металлическую преграду и введено понятие двух типов разрушения: *bi-erosion* и *co-erosion*. В [5] также предложена аналитическая модель образования

Работа выполнена при финансовой поддержке Национального фонда естественных наук Китая (гранты № 11672138, 11602113), Фонда естественных наук провинции Цзянсу (грант № ВК20161055) и Фонда поддержки фундаментальных исследований Центральными университетами (грант № 30916011348).

© Тан К., Ван Ц., Чэнь С., Чжоу Н., 2019

кратера в металлической преграде при проникании в нее с высокой скоростью ударников с облицовкой. Результаты численного моделирования процесса соударения с преградой стержней из обедненного урана со стальной облицовкой представлены в работе [6]. В [7] с использованием законов сохранения массы, количества движения и энергии разработана аналитическая модель образования кратера при проникании в полубесконечную преграду стержней с облицовкой, а также предложена формула для определения глубины проникания. В перечисленных выше работах исследовано незначительное количество материалов облицовки и представлены экспериментальные данные, полученные при скоростях соударения ударника с преградой, принадлежащих интервалу $1,6 \div 2,5$ км/с.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального, численного и теоретического исследований процесса проникания в преграду стержней (ударников) из тяжелого вольфрама 93 % W — 4,9 % Ni — 2,1 % Fe (вольфрам марки 93W) с облицовкой из алюминиевого сплава марки 1060Al и титанового сплава марки Ti-6Al-4V (сплав марки TC4). Для всех стержней отношение длины L к диаметру D равно 10, скорость соударения с преградой изменялась в диапазоне $0,9 \div 3,3$ км/с. С использованием результатов баллистических экспериментов и численного моделирования исследуется характер разрушения ударников при их проникании в преграду, а также влияние свойств материала облицовки, скорости соударения и начальной кинетической энергии на процесс проникания ударника в преграду.

1. Эксперименты. В данной работе исследуются ударники в виде цилиндрических стержней, сердечник которых изготовлен из материала с высокой плотностью, а облицовка — из материала с низкой плотностью. Материалом сердечника является тяжелый вольфрам марки 93W, материалом облицовки — сплав алюминия марки 1060Al либо сплав титана марки TC4. Сердечник и облицовка соединялись в результате усадки с помощью инструмента, состоящего из вала и ступицы. Длина ударника $L = 70$ мм, диаметр сердечника $d = 5$ мм, диаметр облицовки $D = 7$ мм. Форма и размеры однородного ударника (без облицовки) из тяжелого вольфрама марки 93W были такими же, как форма и размеры ударников с облицовкой. Для разгона ударников всех трех типов (двух с облицовкой и одного однородного) использовались пороховой пистолет калибром 25 мм и двухступенчатый легкий газовый пистолет калибром 25 мм. Мишенью служила пластина из стали марки 4340.

В табл. 1 приведены баллистические характеристики ударников и преграды (M — масса ударника, V_0 — скорость соударения, E_0 — начальная кинетическая энергия, P — глубина проникания ударника, D_{cr} — диаметр кратера).

2. Численное моделирование. При численном моделировании процессов проникания ударников в преграду и их разрушения использовался пакет AUTODYN, включающий метод конечных элементов. При моделировании ударника применялся метод сглаженных гидродинамических частиц, при моделировании мишени — решатель Лагранжа. Минимальный размер элементов Лагранжа составлял 0,35 мм, диаметр сглаженных гидродинамических частиц — 0,125 мм. Математические модели и уравнения состояния, использованные при моделировании процессов соударения ударников с преградой, представлены в табл. 2. Параметры материалов для всех использованных в данной работе моделей приведены в табл. 3, 4.

На рис. 1 показано проникание ударника в преграду в одном из экспериментов, а также результаты численного моделирования. Видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Поэтому ниже приводятся результаты численного моделирования проникания ударников в преграду, полученные с использованием указанных выше методов.

Таблица 1

Баллистические характеристики ударников и преграды

Номер выстрела	Тип ударника	M , г	V_0 , м/с	E_0 , кДж	P , мм	D_{cr} , мм
1-1	93W	45,57	949	20,52	20	12,5
1-2		45,61	1266	36,55	47	13,0
1-3		45,95	1513	52,59	66	14,0
1-4		27,56	936	12,07	15	11,0
1-5		27,41	1345	24,79	43	10,0
1-6	93W/1060Al	27,42	1654	37,51	66	10,0
1-7		28,20	2240	70,75	100	14,5
1-8		28,70	3212	148,05	49	—
1-9		28,50	3240	149,59	58	—
1-10		29,55	897	11,89	14	12,0
1-11		28,97	1273,5	22,83	39	10,0
1-12	93W/TC4	29,41	1521	34,02	59,5	11,0
1-13		30,30	2299	80,07	100	15,5
1-14		30,60	3276	164,20	106	21,0

Таблица 2

Математические модели и уравнения состояния

Материал	Модель	Уравнение состояния
Вольфрам марки 93W	Джонсона — Кука [8]	Для ударного нагружения
Сталь марки 4340	Джонсона — Кука [8]	Линейное
Сплав марки 1060Al	Штейнберга [9]	Для ударного нагружения
Сплав марки TC4	Штейнберга [9]	Линейное

Таблица 3

Таблица 4

Параметры материала для модели Джонсона — Кука, уравнения состояния для ударного нагружения и линейного уравнения состояния

Параметры материала для модели Штейнберга и уравнения состояния для ударного нагружения

Параметр	Материал	
	Вольфрам марки 93W	Сталь марки 4340
ρ , г/см ³	17,6	7,83
G_0 , ГПа	160,0	81,8
A , ГПа	1,51	0,835
B , МПа	177	510
N	0,12	0,26
C	0,016	0,014
m	1,00	1,03
T_{m0} , К	1723	1793
C_1 , м/с	4029	—
S_1	1,237	—
γ_0	1,54	—
T_r , К	300	300
K , ГПа	—	159
$c \cdot 10^{-2}$, Дж/(кг · К)	1,34	4,77

Параметр	Материал	
	Сплав марки TC4	Сплав марки 1060Al
ρ , г/см ³	4,42	2,70
G_0 , ГПа	41,9	27,1
σ_0 , ГПа	1,33	0,04
T_{m0} , К	2110	1220
C_1 , м/с	5130	5386
S_1	1,028	1,339
dG/dP	0,4819	1,767
$(dG/dT) \cdot 10^4$	-2,698	-1,669
dY/dP	0,0153	0,0026
β	12,0	400
n	0,1	0,27
γ_0	1,23	1,97
σ_m , ГПа	2,12	0,0048

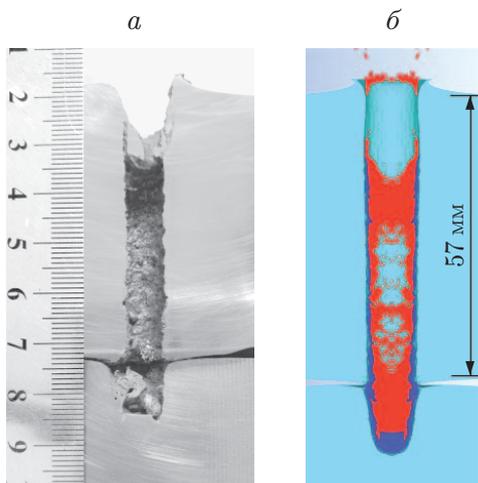


Рис. 1

Рис. 1. Поперечное сечение ударника и мишени (выстрел 1-6):
a — эксперимент, *б* — численное моделирование

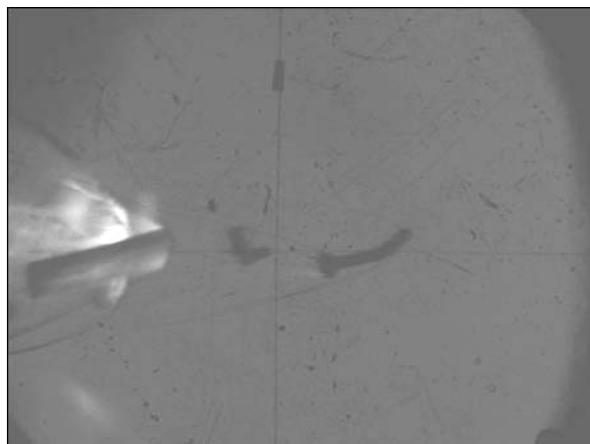


Рис. 2

Рис. 2. Свободный полет ударника, зафиксированный скоростной фотокамерой
 (выстрел 1-8, $V_0 = 3212$ м/с)

3. Результаты исследования и их обсуждение. Далее приводятся результаты исследования разрушения ударников при их проникании в преграду.

3.1. *Анализ устойчивости и целостности ударников в свободном полете.* Как отмечено выше, отношение длины сердечника ударника к диаметру сердечника равно $L/d = 70/5 = 14$. Очевидно, что при большой длине ударника возможно его разрушение в стволе пистолета вследствие изгиба либо в свободном полете вследствие изгибных колебаний. Использование облицовки позволяет существенно увеличить жесткость ударников. Тем не менее необходимо исследовать целостность и устойчивость ударников с облицовкой.

При проведении экспериментов обнаружено, что все ударники с облицовкой, за исключением ударников, полет которых происходил в результате выстрелов 1-8 и 1-9, проникли в мишень. В случае соударения ударников с облицовкой 93W/1060Al (93W — марка вольфрама, являющегося материалом сердечника, 1060Al — марка алюминиевого сплава, являющегося материалом облицовки) и мишени со скоростями 3212 и 3240 м/с в результате выстрелов 1-8 и 1-9 соответственно образовались одно глубокое отверстие и одно неглубокое. На рис. 2 показан ударник с облицовкой 93W/1060Al в свободном полете после выстрела 1-8. Видно, что этот ударник изогнут. После выстрела 1-9 ударник с облицовкой 93W/1060Al разрушился в свободном полете. Ни один из ударников с облицовкой 93W/ТС4 (93W — марка вольфрама, являющегося материалом сердечника, ТС4 — марка титанового сплава, являющегося материалом облицовки) не разрушился до момента соударения с мишенью. Очевидно, что ударники с облицовкой из титанового сплава имеют большую жесткость, чем ударники с облицовкой из алюминиевого сплава.

3.2. *Анализ разрушения ударников.* Ниже на основе результатов экспериментов и численного моделирования исследуется характер разрушения однородных ударников из тяжелого вольфрама 93W и ударников с облицовкой из титанового сплава ТС4 и алюминиевого сплава 1060Al.

На рис. 3 показано проникание в мишень ударников трех типов при скоростях соударения в диапазоне $0,8 \div 1,6$ км/с. При проникании в преграду однородных ударников из

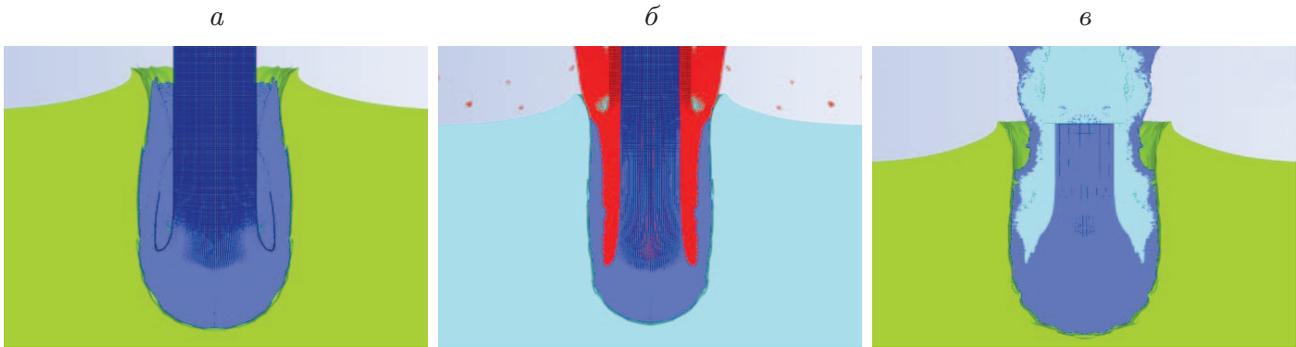


Рис. 3. Проникание в преграду ударников трех типов:

a — однородный ударник из вольфрама марки 93W ($V_0 = 949$ м/с), *б* — ударник с облицовкой 93W/1060Al ($V_0 = 936$ м/с), *в* — ударник с облицовкой 93W/ТС4 ($V_0 = 930$ м/с)

вольфрама марки 93W у них образуется грибовидная головка (см. рис. 3, *a*). При скорости соударения $V_0 \approx 936$ м/с на ранней стадии проникания ударники с облицовкой из алюминиевого сплава 1060Al разрушаются по типу *bi-erosion*, на поздней стадии — по типу *co-erosion* [7] (см. рис. 3, *б*). Такой характер разрушения ранее не наблюдался ни в экспериментах, ни при численном моделировании. При увеличении скорости соударения ударники с облицовкой из алюминиевого сплава 1060Al разрушаются только по типу *co-erosion*. Ударники с облицовкой из титанового сплава ТС4 разрушаются по типу *co-erosion* при скоростях соударения в диапазоне $V_0 = 0,8 \div 1,6$ км/с. Из результатов экспериментов и численного моделирования следует, что при одной и той же скорости соударения наибольший диаметр канала проникания имеет место при проникании в мишень однородных стержней из вольфрама марки 93W, а наименьший — при проникании ударников с облицовкой из алюминиевого сплава 1060Al. Таким образом, свойства материала облицовки оказывают существенное влияние на характер разрушения ударников. Вблизи головки сердечника ударников с облицовкой 93W/ТС4 видны выпуклости (см. рис. 3, *в*), размер которых уменьшается с увеличением скорости соударения. У ударников с облицовкой 93W/1060Al такие выпуклости отсутствуют. Поскольку облицовка из титанового сплава ТС4 оказывает большее сопротивление обратному течению частиц разрушенного материала, чем облицовка из алюминиевого сплава, деформации ударников с титановой облицовкой существенно больше. Поэтому в случае стержней с облицовкой из титанового сплава диаметр канала проникания также больше. При скоростях соударения $V_0 = 2,2 \div 3,3$ км/с процесс проникания в преграду ударников трех типов представляет собой гидродинамическое течение.

3.3. Влияние материала облицовки и параметров соударения на характер проникания ударника в мишень. При проникании ударников в полубесконечную мишень происходит разрушение двух типов: *bi-erosion* и *co-erosion* [5–7]. При разрушении по типу *co-erosion* процесс проникания снаряда в мишень более эффективен. Как отмечено в подп. 3.2, свойства материала облицовки оказывают существенное влияние на характер разрушения ударников. Ниже приводятся результаты анализа разрушения ударников с использованием математических моделей.

На рис. 4 приведены теоретические и экспериментальные зависимости безразмерного радиуса кратера R_{cr}/r_{j0} (r_{j0} — радиус облицовки) от скорости соударения ударника и мишени. При математическом моделировании использованы модели, предложенные в работах [5, 7]. Очевидно, что зависимость, полученная с использованием модели, предложенной в [7], ближе к экспериментальной. В [7] также отмечается, что теоретические результаты,

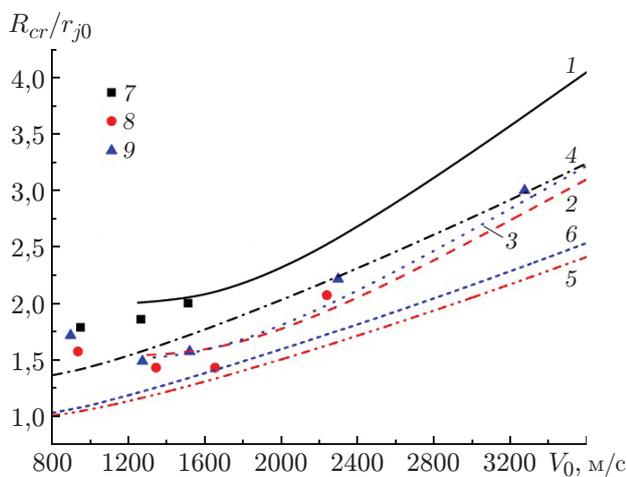


Рис. 4

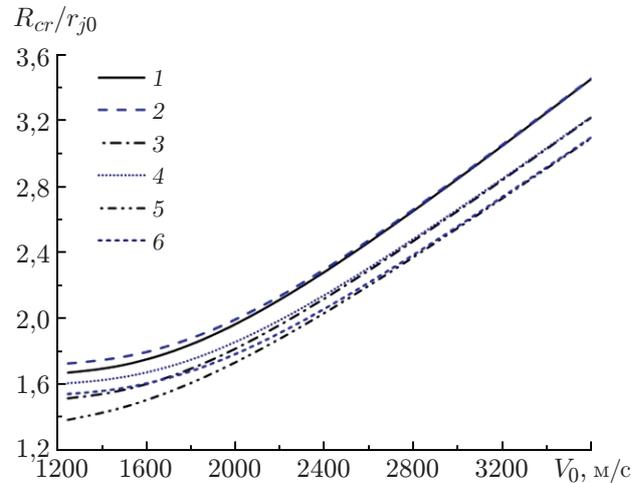


Рис. 5

Рис. 4. Зависимость радиуса кратера от скорости соударения ударника и мишени: 1–3 — результаты расчета по модели [7], 4–6 — результаты расчета по модели [5], 7–9 — экспериментальные данные; 1, 4, 7 — однородный ударник из вольфрама марки 93W, 2, 5, 8 — ударник с облицовкой 93W/1060Al, 3, 6, 9 — ударник с облицовкой 93W/ТС4

Рис. 5. Зависимость радиуса кратера от скорости соударения для ударников с различными плотностью ρ_j и пределом текучести Y_j материала облицовки: 1, 2 — $\rho_j = 7,83 \text{ г/см}^3$ (1 — $Y_j = 1330 \text{ МПа}$, 2 — $Y_j = 40 \text{ МПа}$), 3, 4 — $\rho_j = 4,42 \text{ г/см}^3$ (3 — $Y_j = 1330 \text{ МПа}$, 4 — $Y_j = 40 \text{ МПа}$), 5, 6 — $\rho_j = 2,70 \text{ г/см}^3$ (5 — $Y_j = 1330 \text{ МПа}$, 6 — $Y_j = 40 \text{ МПа}$)

полученные с использованием модели, предложенной в этой работе, хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в [10]. Поэтому в данной работе при исследовании влияния свойств материала облицовки на глубину проникания ударника в мишень используется математическая модель, предложенная в [7].

На рис. 5 приведена зависимость радиуса кратера от скорости соударения для ударников с различными характеристиками материала облицовки. Зависимости получены для ударников, внешний радиус которых равен 3,5 мм, отношение $r_{j0}/r_{c0} = 1,4$. Мишень изготовлена из стали марки 4340. Из рис. 5 следует, что радиус кратера в большей степени зависит от плотности материала облицовки, чем от его предела текучести. Чем меньше плотность, тем меньше радиус кратера. При одной и той же плотности материала облицовки с увеличением скорости соударения влияние предела текучести на величину радиуса кратера уменьшается.

Таким образом, радиус кратера в большей степени зависит от плотности материала облицовки, чем от его предела текучести. Зависимость радиуса кратера от предела текучести облицовки существенна только при малых скоростях соударения. При фиксированном значении отношения r_{j0}/r_{c0} целесообразно использовать стержни с меньшей плотностью материала облицовки и прочностью, обеспечивающей наименьшую жесткость на изгиб.

Ниже на основе экспериментальных данных анализируется эффективность проникания в мишень ударников с облицовкой. При этом для однородных стержней из вольфрама марки 93W при скоростях соударения $V_0 > 1,65 \text{ км/с}$ используются экспериментальные данные, приведенные в работе [11]. На рис. 6 представлена зависимость глубины проникания ударника в мишень от скорости соударения для ударников различного типа. При скоростях соударения в диапазоне $V_0 = 0,90 \div 1,65 \text{ км/с}$ глубина проникания однородных

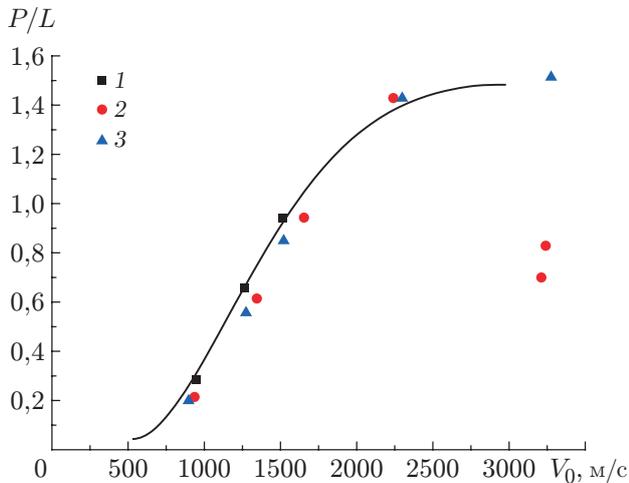


Рис. 6

Рис. 6. Зависимость глубины проникания ударника в преграду от скорости соударения:

точки — экспериментальные данные (1 — однородный ударник из вольфрама марки 93W, 2 — ударник с облицовкой 93W/1060Al, 3 — ударник с облицовкой 93W/ТС4), линия — аппроксимирующая кривая

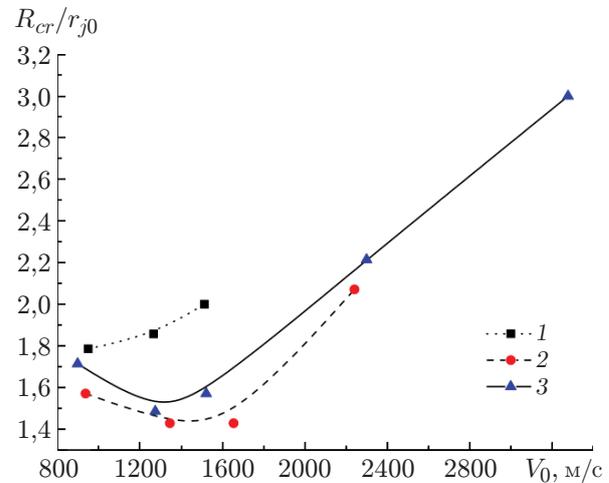


Рис. 7

Рис. 7. Зависимость радиуса кратера от скорости соударения:

1 — однородный ударник из вольфрама марки 93W, 2 — ударник с облицовкой 93W/1060Al, 3 — ударник с облицовкой 93W/ТС4

стержней из вольфрама марки 93W незначительно превышает глубину проникания ударников с облицовкой 93W/1060Al и 93W/ТС4. При скоростях соударения $V_0 > 2,1$ км/с глубина проникания в мишень ударников всех трех типов одна и та же. Однако, как следует из данных, приведенных в табл. 1, масса однородных стержней из вольфрама марки 93W приблизительно на 58 и 70 % больше массы стержней с облицовкой 93W/ТС4 и 93W/1060Al соответственно. При скоростях соударения $V_0 = 0,90 \div 1,65$ км/с радиус кратера, образующегося при проникании в мишень однородных стержней из вольфрама марки 93W, больше радиуса кратера, образующегося при проникании в мишень ударников с облицовкой (рис. 7). Чем больше радиус кратера, тем больше сила сопротивления и тем меньше глубина проникания ударника. Возможно, поэтому при скоростях соударения, находящихся в указанном выше диапазоне, глубина проникания однородных ударников из вольфрама марки 93W незначительно превышает глубину проникания ударников с облицовкой.

Из результатов экспериментов следует, что глубина проникания в мишень ударников с облицовкой обоих типов практически одинакова при скоростях соударения $V_0 = 0,90 \div 1,65$ км/с. При скорости соударения $V_0 \approx 2,25$ км/с ударники с облицовкой обоих типов пробивали пластину толщиной 100 мм. Пластины другой толщины не использовались, поэтому сравнение глубин проникания в этом случае не проводилось. При скоростях соударения $V_0 \approx 3,25$ км/с глубина проникания в мишень ударников с облицовкой 93W/ТС4 существенно больше глубины проникания ударников с облицовкой 93W/1060Al. Это обусловлено тем, что при подлете к мишени ударники с облицовкой 93W/1060Al либо изгибаются, либо разрушаются.

На рис. 7 приведены экспериментальные зависимости радиуса кратера от скорости соударения, полученные в данной работе. Для однородных стержней из вольфрама мар-

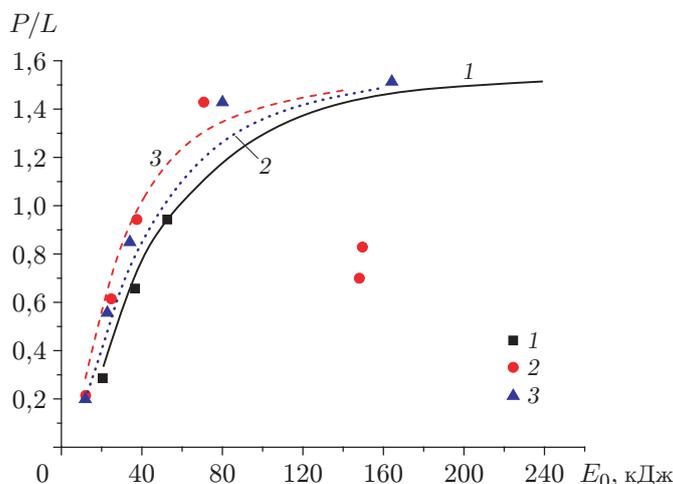


Рис. 8. Зависимость глубины проникания ударника от кинетической энергии: точки — экспериментальные данные, линии — результаты численного моделирования; 1 — однородный ударник из вольфрама марки 93W, 2 — ударник с облицовкой 93W/1060Al, 3 — ударник с облицовкой 93W/ТС4

ки 93W радиус кратера монотонно увеличивается с увеличением скорости соударения. Для стержней с облицовкой радиус кратера также монотонно увеличивается при скоростях соударения $V_0 > 1,6$ км/с. При $V_0 = 0,9 \div 1,6$ км/с радиус кратера для ударников с облицовкой уменьшается. Таким образом, радиус кратера для ударников с облицовкой существенно зависит от скорости соударения, что в свою очередь влияет на глубину проникания ударников в мишень.

Глубина проникания в мишень ударников с облицовкой зависит от их прочности, веса и начальной кинетической энергии. Основным фактором, влияющим на глубину проникания ударника в мишень, является начальная кинетическая энергия.

Зависимость глубины проникания ударников в мишень от начальной кинетической энергии приведена на рис. 8. Из результатов экспериментов и численного моделирования следует, что глубина проникания стержней с облицовкой существенно больше глубины проникания однородных стержней из вольфрама марки 93W. Например, при начальной кинетической энергии $E_0 = 36,55$ кДж глубина проникания стержней с облицовкой 93W/1060Al на 43,5 % больше глубины проникания однородных стержней из вольфрама марки 93W. Из результатов экспериментов следует, что при кинетической энергии, принадлежащей диапазону $E_0 = 12 \div 40$ кДж, глубина проникания ударников с облицовкой 93W/1060Al и 93W/ТС4 одинакова и с увеличением кинетической энергии увеличивается по линейному закону. Однако из результатов численного моделирования следует, что глубина проникания стержней 93W/1060Al больше глубины проникания стержней 93W/ТС4. По-видимому, это объясняется тем, что в отличие от численного моделирования в эксперименте не все стержни соударяются с мишенью под прямым углом. При кинетической энергии $E_0 > 40$ кДж скорость увеличения глубины проникания при увеличении кинетической энергии постепенно уменьшается и затем перестает изменяться. С увеличением кинетической энергии глубина проникания стержней 93W/1060Al прекращает изменяться при меньших значениях кинетической энергии по сравнению со стержнями 93W/ТС4. Для однородных стержней из вольфрама марки 93W значение кинетической энергии, при превышении которого перестает изменяться глубина проникания, является наибольшим.

Заключение. Анализ результатов проведенного исследования позволяет сделать следующие выводы.

При скоростях соударения, меньших 2 км/с, глубина проникания в мишень однородных ударников из вольфрама марки 93W больше глубины проникания ударников с облицовками 93W/1060Al и 93W/ТС4, несмотря на то что масса однородных ударников из вольфрама на 58 и 70 % больше массы ударников 93W/1060Al и 93W/ТС4 соответственно. При скоростях соударения, превышающих 2 км/с, глубина проникания ударников трех рассмотренных типов одинакова. При одной и той же начальной кинетической энергии глубина проникания ударников с облицовкой больше глубины проникания однородных ударников из вольфрама марки 93W. Глубина проникания ударников 93W/1060Al больше глубины проникания ударников 93W/ТС4.

У однородных ударников из вольфрама марки 93W при проникании в мишень образуется грибовидная головка, диаметр которой монотонно увеличивается с увеличением скорости соударения. При скоростях соударения, приближенно равных 936 м/с, тип разрушения ударников с облицовкой 93W/1060Al изменяется от *bi-erosion* до *co-erosion*. Ударники с облицовкой 93W/ТС4 при любых скоростях, превышающих критические значения, разрушаются по типу *co-erosion*.

Ударники с облицовкой из титанового сплава ТС4 обладают большей жесткостью на изгиб, чем ударники с облицовкой из сплава 1060Al. Ударники с облицовкой из титанового сплава ТС4, обладающие большей жесткостью, тормозятся обратным потоком частиц разрушенного материала, в результате чего вблизи головки ударника образуются выпуклости и увеличивается диаметр кратера.

Из результатов теоретических исследований следует, что при фиксированном значении отношения r_{j0}/r_{c0} целесообразно использовать стержни с меньшей плотностью материала облицовки и прочностью, обеспечивающей необходимую жесткость на изгиб.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ernst H. J., Lanz W., Wolf T.** Penetration comparison of $L/D = 20$ and 30 mono-block penetrators with $L/D = 40$ jacketed penetrators in different target materials // Proc. of the 19th Intern. symp. on ballistics, Interlaken (Switzerland), 7–11 May 2001. Interlaken: S. n., 2001. P. 1151–1158.
2. **Andersson O., Ottosson J.** High velocity jacketed long rod projectiles hitting oblique steel plates // Proc. of the 19th Intern. symp. on ballistics, Interlaken (Switzerland), 7–11 May 2001. Interlaken: S. n., 2001. P. 1241–1247.
3. **Lehr H. F., Wollman E., Koerber G.** Experiments with jacketed rods of high fineness ratio // Intern. J. Impact Engng. 1995. V. 17. P. 517–526.
4. **Pedersen B. A., Bless S. J., Cazamias J. U.** Hypervelocity jacketed penetrators // Intern. J. Impact Engng. 2001. V. 26. P. 603–611.
5. **Lee M.** Analysis of jacketed rod penetration // Intern. J. Impact Engng. 2000. V. 24. P. 891–905.
6. **Sorensen B. R., Kimsey K. D., Zukas J. A., Frank K.** Numerical analysis and modeling of jacketed rod penetration // Intern. J. Impact Engng. 1999. V. 22. P. 71–91.
7. **Wen H. M., He Y., Lan B.** A combined numerical and theoretical study on the penetration of a jacketed rod into semi-infinite targets // Intern. J. Impact Engng. 2011. V. 38. P. 1001–1010.
8. **Johnson G. R., Cook W. H.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature // Proc. of the 7th Intern. symp. on ballistics, Hague (Netherlands), 19–21 Apr. 1983. Hague: S. n., 1983. P. 541–547.

9. **Steinberg D. J., Cochran S. G., Guinan M. W.** A constitutive model for metals applicable at high strain rate // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. P. 1498–1504.
10. **Cullis I. G., Lynch N. J.** Hydrocode and experimental analysis of scale size jacketed KE projectiles // Proc. of the 14th Intern. symp. on ballistics, Quebec (Canada), 26–29 Sept. 1993. Sundbyberg: Nat. Defence Res. Establishment, 1993. P. 271–280.
11. **Anderson C. E., Morris B. L., Littlefield D. L.** A penetration mechanics database: Report / Southwest Res. Inst. N 3591/001. San Antonio, 1992.

*Поступила в редакцию 7/XII 2018 г.,
после доработки — 16/I 2019 г.
Принята к публикации 28/I 2019 г.*
