

## Экспериментальное исследование энергетических характеристик высокоскоростного взаимодействия металлического ударника с преградой

© М.К. Марахтанов, В.А. Велданов, Д.В. Духопельников,  
А.С. Карнейчик, М.А. Максимов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Начиная с 1930—1940 гг. в военно-научной литературе публикуются сведения о броневой действии свинцовых пуль и о предельно высокой эффективности продуктов взрыва металлического свинца. Экспериментальные результаты в то время были получены при исследовании выстрела легкой свинцовой пулей, пробивавшей броню толщиной 12,8 мм на скорости 1 700 м/с. Сохранится ли эффект бронепробития при меньшей скорости свинцовой пули (снаряда), оставалось невыясненным до настоящего времени. Показано, что эффект пробития броневой плиты средней твердости толщиной 35 мм свинцовым ударником диаметром 30 мм сохраняется и при меньшей скорости ударника, равной 667...760 м/с. Данное значение практически совпадает с критической скоростью взрывоподобного разрушения свинца, определяемой теоретически.*

**Ключевые слова:** *снаряд, мишень, баллистическая установка, кратер, высокоскоростное проникание, кинетическая энергия, взрывоподобное разрушение, ударная волна, калориметрия.*

В процессе удара металл деформируется и нагревается, его кристаллическая решетка разрушается. Пример подобного явления (назовем его инерциальным взрывом) дает нам сама природа, когда металлический метеорит взрывается при ударе о Землю. Метеориты бывают железными, железоканненными и канненными. Железные метеориты состоят из сплава камасит со средним содержанием (% мас.): Fe — 89,7; Ni — 9,1; Co — 0,62. Но и в состав канненных метеоритов входит не менее 20...25 % сплава FeNi. Металлические метеориты имеют кристаллическую структуру с металлической связью. Встречаются метеориты-монокристаллы. Ненаправленная металлическая связь метеорита разрушается при направленном ударе о твердый грунт [1].

«Современные теории электричества, — писали Р. Толмен и Т. Стюарт, первыми измерившие массу электрона в 1916 г. [2], — укрепляют уверенность в том, что протекание электрического тока через металл состоит в поступательном движении «свободных» электронов, содержащихся в самом металле. Если это так, то должен суще-

ствовать ряд эффектов, связанных с массой данных электронов. Например, можно ожидать, что тыльный конец ускоряемого стержня (*метод ускорения*)<sup>1</sup> станет отрицательным вследствие отставания относительно подвижных электронов, содержащихся в металле».

Причина инерциального взрыва металлического ударника связана с коллективным перемещением почти свободных электронов внутри его кристаллической решетки, в результате чего электроны теряют способность «склеивать» узлы решетки в прочный кристаллический каркас [3–5]. Освободившиеся ионы вылетают из узлов решетки под действием расталкивающих электрических сил (кулоновский взрыв) [6]. Энергия этого взрыва разрушает и металл-ударник, и мишень-преграду. Настоящая работа посвящена качественной оценке данной энергии.

Известно, что вероятность взрыва метеорита зависит от скорости  $v$  встречи с поверхностью Земли, т. е. от значения отрицательного ускорения узлов его кристаллической решетки. Если  $v < 1\,000$  м/с, метеорит останется целым [1, 7]. При скорости  $v = 2\,000 \dots 4\,000$  м/с вследствие удара происходит мощный взрыв и наблюдается почти полное или полное испарение металла. Поэтому с высокой степенью достоверности можно полагать, что железный метеорит «испаряется» полностью, если скорость удара  $v > 4\,000$  м/с, и остается целым, если  $v < 2\,000$  м/с [1]. Следовательно, в интервале скоростей  $2\,000$  м/с  $< v < 4\,000$  м/с в кристаллической решетке метеорита происходят необратимые изменения, приводящие к ее распаду. Решетка разрушается полностью, если каждый атом железа, составляющего метеорит, имеет перед ударом о землю кинетическую энергию

$$w \geq \frac{m_p A v^2}{2e} \approx 10^{-8} \frac{A v^2}{2} \approx 10^{-8} \frac{56 \cdot 4\,000^2}{2} \approx 4,48 \text{ эВ/атом}, \quad (1)$$

где  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг — масса протона;  $A = 56$  а. е. м. — атомная масса железа;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона, который использован для перевода единицы энергии из джоулей в электронвольты. Значение, полученное в неравенстве (1), практически совпадает со значением энергии металлической связи железа  $\varepsilon = 4,29$  эВ/атом [8]. Исходя из равенства энергий ( $w = \varepsilon$ ), сформулируем следующее правило: *инерциальный взрыв может охватить весь объем движущегося металлического тела, если скорость  $v$  удара тела о твердую преграду удовлетворяет неравенству*

---

<sup>1</sup> Выделено авторами.

$$\nu \geq \sqrt{\frac{2w}{m}} \approx 10^4 \sqrt{\frac{2\varepsilon}{A}}. \quad (2)$$

Предположение о выделении из металла энергии, искусственно внесенной в него в ходе металлургического процесса, существовало и ранее. Так, в 1929 г. русский конструктор ракетных двигателей В.П. Глушко в своей работе [9] показал, что, во-первых, металл можно использовать как взрывчатое вещество и, во-вторых, что уран является лучшим взрывчатым веществом среди остальных металлов. В.П. Глушко анализировал электрический, а не инерциальный (и не ядерный) взрыв металлов и вычислил температуру продуктов подобного взрыва (табл. 1). Поскольку данная температура есть мера энергии газообразной среды, можно заключить, что продукты взрыва урана имеют максимальную энергию по сравнению с остальными металлами. В этом смысле уран и близкие к нему свинец и висмут выгоднее всего использовать в качестве вещества, способного к взрывчатому превращению. При этом объем газообразных продуктов взрыва у металлов в несколько раз больше, чем объем продуктов взрыва таких веществ, как тринитротолуол или нитроглицерин, считал В.П. Глушко.

Таблица 1

**Температура, усл. ед., продуктов электрического взрыва различных металлов [9]**

Металл	Температура продуктов взрыва	Металл	Температура продуктов взрыва	Металл	Температура продуктов взрыва
Уран	34,32	Олово	17,11	Марганец	7,91
Радий	32,56	Кадмий	16,20	Хром	7,49
Висмут	30,12	Серебро	15,54	Ванадий	7,35
Свинец	29,85	Палладий	15,37	Кальций	5,75
Ртуть	28,90	Молибден	13,83	Калий	5,65
Золото	28,31	Цинк	9,42	Алюминий	3,89
Платина	28,13	Медь	9,16	Литий	3,50
Иридий	27,82	Никель	8,45	Магний	3,31
Осмий	27,51	Кобальт	8,50	Натрий	1,30
Вольфрам	26,51	Железо	8,05	Бериллий	1,00

Вероятность того, что вся масса ударника или только ее часть будут способны к взрывчатому превращению, зависит от отношения кинетической энергии  $w$  каждого атома металла (1) к энергии  $\varepsilon$  металлической связи [8], которая стремится сохранить неизменной кристаллическую решетку разрушаемого металла. Чем ближе к единице отношение

$$f = \frac{w}{\varepsilon}, \quad (3)$$

тем вероятнее, что удар нарушит металлическую связь, и большая часть ударника испытает взрывоподобное разрушение. Поскольку энергия связи у всех металлов различна, вероятность этого процесса будет также различной при одинаковой скорости удара. Это условие позволяет составить вероятностный ряд [10], в начале которого располагаются металлы, способные к взрывному разрушению при меньшей критической скорости  $u_{кр}$  ударника, а замыкают ряд те из металлов, для которых  $u_{кр}$  равна скорости метеорита (табл. 2).

*Таблица 2*

**Критическая скорость  $u_{кр}$  металлического снаряда, обеспечивающая его взрыв**

Металл	Атомная масса $A$ , а. е. м.	Энергия связи $\varepsilon$ , эВ/атом	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Критическая скорость $u_{кр}$ , м/с
Цезий	133	0,83	1 873	558
Свинец	207	2,04	11 350	702
Висмут	209	2,15	9 747	717
Кадмий	112	1,16	8 650	718
Барий	137	1,86	3 594	823
Цинк	65	1,35	7 133	1 006
Индий	115	2,6	7 310	1 063
Уран	238	5,40	18 950	1 066
Олово	119	3,12	5 750	1 145
Тантал	181	8,09	16 654	1 495
Вольфрам	184	8,66	19 300	1 535
Медь	64	3,50	8 960	1 660
Цирконий	91	6,32	6 506	1 863
Молибден	96	6,81	10 220	1 883
Никель	59	4,43	8 902	1 944
Железо	56	4,29	7 874	1 960
Ниобий	93	7,47	8 570	2 004
Титан	48	4,85	4 540	2 249
Алюминий	27	3,34	2 698	2 487
Бериллий	9	3,33	1 847	4 301

*Примечание:* Коэффициент эффективности удара  $f = 0,25$  [10].

Критическую скорость удара  $v_{кр}$ , при которой произойдет распад решетки [10], найдем из условия

$$\frac{mv_{кр}^2}{2e} \geq f\varepsilon, \quad (4)$$

где  $f$  — отношение (3). Подставляя в это неравенство значения физических констант, получаем выражение для определения критической скорости удара, приводящей к инерциальному взрыву металлического снаряда:

$$v_{кр} \geq \sqrt{\frac{2ef\varepsilon}{m_p A}} = \sqrt{2f \frac{10^8 \varepsilon}{A}}. \quad (5)$$

Отношение  $f$  назовем коэффициентом эффективности удара. Его значение определяется экспериментально и находится [10] в диапазоне

$$0,075 < f \leq 1. \quad (6)$$

Следует отметить, что свинец и висмут располагаются в начале, а бериллий и алюминий — в конце табл. 1 и 2, т. е. свинец не только способен к взрывному превращению при меньших скоростях, чем другие металлы, но и выделяет при этом большую энергию. Эта энергия была определена экспериментально в работе [4], в которой сравнивали свинцовые ударники с железными и алюминиевыми (диаметр всех ударников 14,5 мм). При этом учитывалось влияние формы ударника на его эффективность. Следует отметить, что энергия, выделяемая свинцовым ударником при встрече с дюралюминиевой преградой, превосходит в 2,18 раза кинетическую энергию ударника [4, 5]. Скорость последнего составляет  $1300 \pm 20$  м/с. Экспериментально установлено, что энергия, выделяющаяся при ударе стального ударника по мишени, выполненной из броневой стали, может превысить в 1,2–4 раза кинетическую энергию ударника [11]. При этом скорость ударников равна 1000...1390 м/с, а диаметр — 23 мм.

Инерциальный взрыв свинца, вызванный большой скоростью ударника, был получен еще в прошлом веке. В 1935—1940 гг. в советской военной литературе неоднократно сообщалось о винтовочных пулях (рис. 1) [12, 13]. Они были сделаны из обычного свинца, но пробивали стальную броню толщиной 12,8...25,4 мм (рис. 2). И винтовка «хольгер-ультра», и пуля для нее были разработаны немецким инженером Г. Герлихом. Коническая форма канала ствола и высококачественный порох позволили получить начальную скорость

полета пули, равную 1 700 м/с, вместо обычных 850 м/с [12]. Пуля для винтовки «хольгер-ультра» калибра 7 мм, очень легкая, с обычным свинцовым сердечником, пробивала броню толщиной более 20 мм, оставляя в ней отверстия в 2 раза больше своего калибра, откалывая целые куски стали, чего с «медленными» пулями никогда не происходило (см. рис. 1, 2). Таким образом, свинцовый сердечник оказался при больших скоростях более эффективным, чем специальная бронебойная пуля [12].

Опыты Г. Герлиха показали, что увеличение начальной скорости поступательного и вращательного движения свинцовой пули выше известного предела имеет исключительно важное значение для эффекта пробиваемости броневых плит высокой прочности. Скучные материалы, приведенные в печати того времени на основе опытов госу-



Рис. 1. Свинцовая пуля, прошедшая сквозь броню (калибр 7 мм совпадает с диаметром светлого кольца (см. поз. а)) [12]:

а, б — вид на донную часть; в — вид на носовую часть

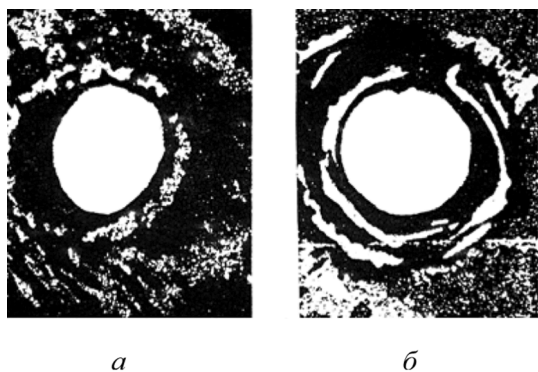


Рис. 2. Пробоины в броне толщиной 12,8 мм, оставленные свинцовой пулей калибра 7 мм при скорости удара 1 700 м/с [12]:

а — на выходе из брони; б — на входе в броню

дарственных испытательных полигонов Германии и Америки, не содержали теоретически опровергаемых данных и в то же время были настолько поразительны, что зарубежная военная литература справедливо уделила этому вопросу большое внимание [12].

Необычное воздействие металлических снарядов на стальную мишень, в частности выделение энергии, почти вдвое превышающей кинетическую энергию снаряда, описано в работе [13]. В настоящей работе основное внимание уделено свинцовым ударникам. На рис. 3 представлена пробоина, оставленная свинцовой пулей калибра 8,6 мм в броневом листе толщиной 12 мм. На рис. 4 приведена фотография стальной «пробки», выбитой свинцовым снарядом калибра 30 мм в броневой мишени толщиной 27 мм.



**Рис. 3.** Сквозная пробойна в броневой плите толщиной 12 мм, оставленная винтовочной свинцовой пулей калибра 8,6 мм; слева — входное отверстие, справа — след от стальной пули (снимок предоставлен профессором М.А. Тарасовым)



**Рис. 4.** Стальная пробка, выбитая снарядом калибра 30 мм из броневой плиты толщиной 27 мм (скорость снаряда 860 м/с); слева — полусферическая передняя поверхность пробки, справа — тыльная поверхность той же пробки; диаметр пробки 55...60 мм (снимки предоставлены профессором М.А. Тарасовым)

Для оценки особенностей пробития стальных преград конечной толщины макетными снарядами, содержащими свинец, проведены экспериментальные исследования по сравнительному действию штатного и макетного снарядов, наполненных свинцом. Преградой служила плита броневой стали средней твердости (БСТ) толщиной 35 мм. Стрельба проводилась из нарезного ствола авиационной пушки ГШ-42 калибра 30 мм. Различные скорости снарядов получались за счет изменения масс порохового заряда и снаряда.

На первом этапе испытаний произвели три выстрела:

- осколочно-фугасным снарядом калибра 30 мм с отрезанной головной частью, у которого в корпус в виде стального стакана вставлен стальной (Ст3) цилиндр (масса снаряда 0,412 кг, скорость 748 м/с);
- штатным бронебойным инертным снарядом калибра 30 мм из закаленной стали (масса снаряда 0,402 кг, скорость 715 м/с);
- осколочно-фугасным снарядом калибра 30 мм, у которого стальной стакан заполнен свинцом (масса снаряда 0,414 кг, скорость 759 м/с).

Стальной макетный снаряд не пробил броню, а лишь образовал в ней вмятину глубиной  $h = 10$  мм со средним диаметром на входе  $D = 56$  мм и диаметром на дне  $d = 37$  мм. Объем и масса выдавленной БСТ составили примерно  $17 \text{ см}^3$  и  $0,133$  кг соответственно. Эта масса составляет долю  $f_1 = 0,133 / 0,412 = 0,32$  от исходной массы снаряда.

Штатный бронебойный снаряд пробил плиту с образованием пробки толщиной около 13,5 мм со средним диаметром 42 мм (рис. 5). Головная часть снаряда деформировалась так, что ее контуры повторили форму впадины на лицевой поверхности выбитой пробки. Мишень нагрелась в результате деформации, о чем свидетельствуют цвета побежалости на боковой поверхности пробки (рис. 5, а). Масса пробки равна 0,154 кг, что составляет долю  $f_2 = 0,154 / 0,402 = 0,38$  от исходной массы снаряда.



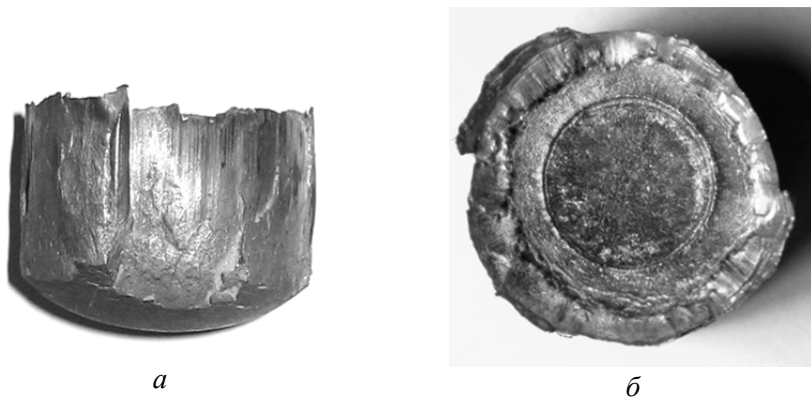
**Рис. 5.** Стальная пробка, выбитая штатным бронебойным снарядом калибра 30 мм из броневой плиты толщиной 35 мм (масса снаряда 0,402 кг, скорость 715 м/с; средний диаметр пробки 42 мм, масса 0,133 кг):

*а* — вид на боковую поверхность пробки, покрытую цветами побежалости стальной брони; *б* — трещина на полусферической тыльной поверхности пробки

Снаряд со свинцовым наполнением выбил из мишени стальную пробку толщиной около 26 мм и средним диаметром 48 мм (рис. 6). Масса пробки равна 0,353 кг, что соответствует доле  $f_3 =$

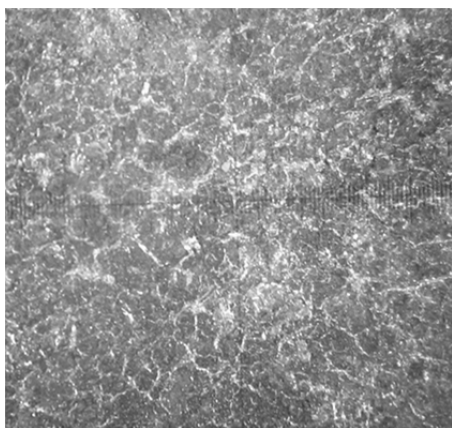


$= 0,353/0,414 = 0,85$  от исходной массы снаряда. Пробка вылетела из холодной мишени, на что указывает отсутствие цветов побежалости на ее поверхности. Структура поверхности пробки на тыльной стороне отличается от ее лицевой поверхности (рис. 7, 8).



**Рис. 6.** Стальная пробка, выбитая свинцовым снарядом калибра 30 мм из броневой плиты толщиной 35 мм (масса снаряда 0,414 кг, скорость 759 м/с; средний диаметр пробки 48 мм, масса 0,353 кг):

*a* — вид сбоку, цвета побежалости отсутствуют; *б* — лицевая поверхность той же пробки



**Рис. 7.** Микрофотография лицевой поверхности стальной пробки (см. рис. 6, *б*) (габариты стальных зерен на поверхности пробки 0,478×0,813 мм)



**Рис. 8.** Тыльная полусферическая поверхность пробки (см. рис. 6, *а*), на которой броня растянута (зерна растресканной поверхности отсутствуют; ширина фотографии 9,5 мм)

Отнесем к массе стальной пробки, вытесненной из БСТ толщиной 35 мм, кинетическую энергию снаряда калибра 30 мм, оставившего соответствующую пробоину (или вмятину) в броневой плите.

Получим выражение удельной энергии, необходимой для пробития (или деформации) плиты из БСТ:

$$\alpha = \frac{w}{M}, \text{ Дж/кг.} \quad (7)$$

Результаты решения уравнения (7) для трех снарядов, рассмотренных выше, приведены в табл. 3.

*Таблица 3*

**Удельная энергия  $\alpha$ , необходимая для пробития плиты из БСТ толщиной 35 мм и вытеснения из нее пробки соответствующей массы**

Материал снаряда калибра 30 мм	Масса выбитой пробки $M$ , кг	Масса снаряда $m$ , кг	Скорость $v$ , м/с	Кинетическая энергия $w$ , Дж	Доля $f = w/M$	Удельная энергия $\alpha$ , Дж/кг
Ст3	0	0,412	748	115 258	0,32	$\infty$
Бронебойный сердечник	0,133	0,402	715	102 756	0,38	772 601
Свинец	0,353	0,414	759	119 249	0,85	337 816

Как следует из табл. 3, переход на свинцовый сердечник для пробития плиты из БСТ равносителен увеличению в 1,5 раза скорости стандартного бронебойного снаряда, масса и калибр (30 мм) которого

такие же, как у свинцового снаряда:  $n = \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_3}} = \sqrt{\frac{772\ 601}{337\ 816}} = 1,5$ . Ис-

ходными условиями сравнения являются равенства начальных скоростей  $v_2 \approx v_3$  и масс выбитых снарядами пробок  $M_2 \approx M_3$ . Для снаряда из мягкой стали Ст3 удельная энергия  $\alpha$  стремится к бесконечности, поскольку такой снаряд не может пробить плиту из БСТ и выбить из нее броневую пробку при указанной скорости.

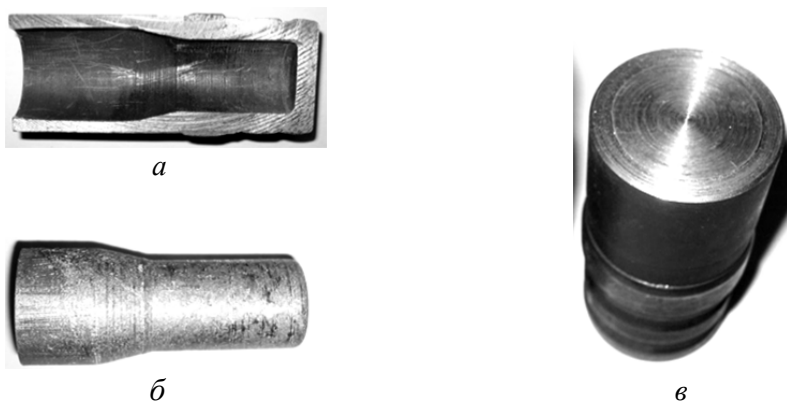
На втором этапе испытаний проведены сравнительные выстрелы штатными бронебойно-трассирующими (рис. 9, а) и макетными снарядами, выполненными на основе осколочно-фугасного снаряда, в котором внутренний объем заполнен свинцовым сердечником (рис. 9, б).

Экспериментально установлено, что минимальная скорость пробития плиты из БСТ толщиной 35 мм при выстреле по нормали штатным бронебойно-трассирующим снарядом (см. рис. 9, а) массой 0,38 кг составила 693...707 м/с. При меньшей скорости снаряд не пробивал плиту. При увеличении скорости снаряд выбивал в плите пробку диаметром 33...35 мм. При этом отверстие в плите имело диаметр около 30 мм. С ростом скорости снаряда вплоть до 950 м/с размеры выбитой пробки и диаметр отверстия в мишени практически не изменялись.



**Рис. 9.** Штатный бронебойно-трассирующий снаряд (а) и корпус штатного осколочно-фугасного снаряда, подготовленный к заполнению свинцовым сердечником (б) (калибр обоих снарядов 30 мм)

При выстреле макетным снарядом со свинцовым наполнением (рис. 10) плита из БСТ была пробита при скорости встречи, равной 760 м/с. Масса снаряда 0,414 кг, масса свинцового сердечника 0,206 кг. Диаметр отверстия в плите составил 44...45 мм (рис. 11).



**Рис. 10.** Корпус штатного осколочно-фугасного снаряда, подготовленный к заполнению свинцовым сердечником (а); свинцовый сердечник массой 0,206 кг перед запрессовкой в корпус (диаметр головной части свинцового сердечника 23 мм) (б); макетный «свинцовый» снаряд в сборе перед выстрелом (полная масса снаряда 0,414 кг) (в)



**Рис. 11.** Две пробоины в плите из БСТ толщиной 35 мм, оставленные макетным снарядом со свинцовым сердечником (вверху) и штатным бронебойно-трассирующим снарядом (внизу) (диаметр снарядов 30 мм, диаметр верхнего отверстия 44...45 мм)

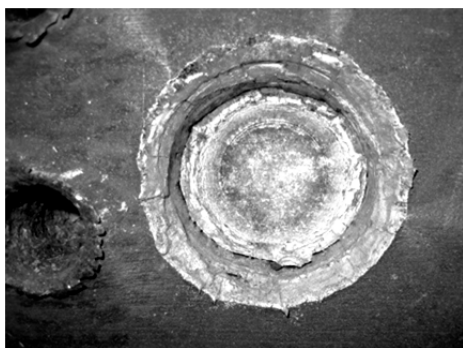
Макетный снаряд массой 0,378 г (масса свинцового сердечника 0,185 кг) при скорости встречи 667 м/с не пробил плиту. Вместе с тем в результате удара произошло практически полное выбивание пробки (рис. 12).

Таким образом установлено, что модельные снаряды калибра 30 мм со свинцовым сердечником пробивают по нормали плиту толщиной 27...35 мм из БСТ и выбивают из нее пробку, диаметр которой увеличивается с ростом скорости снаряда (табл. 4). Передняя часть снаряда, которой он ударяет по броне, представляет собой плоский свинцовый круг, ограниченный кольцом тонкой стенки стального стакана (см. рис. 10).

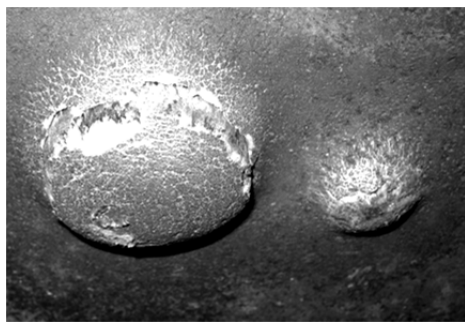
*Таблица 4*

**Диаметр пробки, выбитой «бронебойным» снарядом калибра 30 мм с свинцовым сердечником, из плоской мишени (БСТ) различной толщины (скорость снаряда нормальна к плоскости мишени)**

Толщина мишени, мм	Диаметр сердечника, мм	Скорость удара снаряда, м/с	Средний диаметр пробки, мм
27	26	860	57,5
35	23	759	48
35	23	760	44,5
35	23	667	42



*а*



*б*

**Рис. 12.** Кратер в плите БСТ толщиной 35 мм, оставленный макетным снарядом массой 0,378 кг со свинцовым сердечником массой 0,185 кг:

- а* — вид с лицевой стороны на полностью сформированную броневую пробку;  
*б* — вид с тыльной стороны, пробка начала выходить из кратера

**Выводы.** Эффект пробития плиты из БСТ толщиной 35 мм свинцовым ударником сохраняется и при меньшей скорости последнего, равной 667...760 м/с. Данная скорость, полученная эксперименталь-

но (см. табл. 4), практически совпадает с критической скоростью  $v_{кр} = 702$  м/с, рассчитанной для свинца теоретически (см. табл. 2).

Большая часть массы свинцового сердечника исчезает, переходя в парообразное состояние в результате удара о стальную броню, т. е. не сохраняется в виде жидкости, гидроударом которой можно было бы объяснить эффект бронепробития.

При пробитии плиты из БСТ штатным стальным бронебойным снарядом калибра 30 мм в преграде выбивается пробка диаметром 33...35 мм; отверстие в плите имеет диаметр порядка 30 мм. При увеличении скорости от 700 до 950 м/с размеры пробки и отверстия практически не изменяются. Если макетный снаряд снабжен свинцовым сердечником массой, равной половине массы всего снаряда, диаметр пробиваемого отверстия и выбиваемой пробки достигает значений порядка 57 мм.

Предельная скорость пробития плиты из БСТ толщиной 35 мм бронебойным снарядом калибра 30 мм по сравнению со снарядом со свинцовым сердечником меньше на 7...10 %. При этом следует отметить, что диаметр пробки, выбиваемой из преграды снарядом со свинцовым сердечником при одинаковой скорости взаимодействия, в 1,7 раза превышает диаметр пробки и соответственно площадь поверхности среза пробки, образованной бронебойным снарядом. Масса пробки, выбитой снарядом со свинцовым сердечником, в 2,8 раза превышает массу пробки, выбитой бронебойным снарядом.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кринов Е.Л. *Гигантские метеориты*. Москва, Изд-во АН СССР, 1952, 95 с.
- [2] Tolman R.C., Stewart T.D. The Electromotive Force Produced by the Acceleration of Metals. *The Physical Review. Second Series*. 1916, vol. VIII, no. 2, pp. 97—116.
- [3] Марахтанов М.К., Марахтанов А.М. Металл взрывается! *Наука и жизнь*, 2002, № 4, с. 16—19.
- [4] Марахтанов М.К., Велданов В.А., Максимов М.А., Тарасов М.А. Некоторые особенности взаимодействия металлического снаряда с металлической преградой. *Известия РАН*, 2009, вып. 1(59), с. 43—53.
- [5] Марахтанов М.К. Металл как источник энергии. *Известия РАН. Энергетика*, 2009, № 1, с. 79—91.
- [6] Духопельников Д.В., Калашников Н.П., Марахтанов А.М., Марахтанов М.К., Ольчак А.С. Кулоновский взрыв тонкой проволоки. *Ядерная физика и инжиниринг*, 2010, т. 1, № 4. с. 339—346.
- [7] Введенский Б.А. ред., *Метеоритные кратеры. Метеориты*. Т. 27: Москва, БСЭ, 1954, с. 287—291.
- [8] Киттель Ч. *Введение в физику твердого тела*. Москва, Наука, 1978, 791 с.
- [9] Глушко В.П. *Металл как взрывчатое вещество. Пионеры ракетной техники. Ветчинкин. Глушко. Королев. Тихонравов. Избранные труды (1929—1945 гг.)*, Москва, Наука, 1972, с. 89—110.
- [10] Марахтанов М.К. *Способ получения энергии из металлических материалов*. Пат. № 2260779, 2005, бюл. № 26.

- [11] Яворский В.В. Энергия из «ниоткуда». Гипотезы, предположения, догадки. *Наука и жизнь*, 1998, № 10, с. 78—79.
- [12] Внуков В.Н. *Физика и оборона страны*. Москва, Воениздат, 1940, 309 с.
- [13] Марахтанов М.К., Велданов В.А., Духопельников Д.В., Карнейчик А.С., Максимов М.А. Результаты взаимодействия металлических снарядов со стальной мишенью. *Вопросы оборонной техники*. сер. 16, вып. 3—4, 2013, № 1, с. 25—34.

Статья поступила в редакцию 26.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Марахтанов М.К., Велданов В.А., Духопельников Д.В., Карнейчик А.С., Максимов М.А. Экспериментальное исследование энергетических характеристик высокоскоростного взаимодействия металлического ударника с преградой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/948.html>

**Марахтанов Михаил Константинович** родился в 1940 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1964 г. Д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области электроракетных двигателей, ионно-плазменных технологий и физики твердого тела. e-mail: [mkm@power.bmstu.ru](mailto:mkm@power.bmstu.ru)

**Велданов Владислав Антонович** родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области конечной баллистики и механики деформируемого твердого тела. e-mail: [vevladi@mail.ru](mailto:vevladi@mail.ru)

**Духопельников Дмитрий Владимирович** родился в 1962 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1986 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области электроракетных двигателей и ионно-плазменных технологий.

**Карнейчик Александр Сергеевич** родился в 1948 г., окончил Куйбышевский политехнический институт в 1972 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные и импульсные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 80 научных работ в области вооружения, специальных баллистических измерительных приборов и проектирования ствольных систем. e-mail: [vevladi@mail.ru](mailto:vevladi@mail.ru)

**Максимов Михаил Александрович** родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1978 г. Заведующий сектором Специального конструкторско-технологического бюро прикладной робототехники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области динамики и механики сплошных сред.