

УДК 623.4.082.6

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СНАРЯДОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ВЗРЫВОМ

Г. Хуссейн, А. Хамид\*, Дж. Г. Хетерингтон\*,  
А. К. Малик, К. Санауллах

Национальный университет наук и технологий, Исламабад, Пакистан

\* Крэнфилдский университет академии обороны Великобритании,

SN6 8LA, Шривенхэм, Великобритания

E-mail: a.hameed@cranfield.ac.uk

С использованием гидрокода пакета Ansys Autodyn (версия 11.0), предназначенного для решения задач гидродинамики, изучено влияние материала облицовки (мягкой стали, меди, армко-железа, алюминия, тантала) на форму, скорость, дальность полета, внутреннее давление, внутреннюю энергию, температуру, отклонение от траектории полета, плотность, компрессию и отношение длины к диаметру метаемых снарядов, формируемых взрывом. Указанные параметры, определенные при максимальной скорости облицовки и в установившемся режиме полета снаряда, характеризуют материалы, используемые для формирования снарядов взрывным способом. Экспериментально определены скорость и отношение длины к диаметру снаряда, формируемого взрывом.

**Ключевые слова:** скорость, напряжение текучести, давление, компрессия, отклонение от траектории полета, устойчивость.

**Введение.** Как правило, кумулятивный снаряд состоит из конической металлической облицовки, в которой в результате сжатия формируется кумулятивная струя с большим градиентом скорости вдоль нее. Вследствие этого струя разделяется на фрагменты, что ограничивает дальность полета снаряда. Для увеличения дальности полета потребовалось изменить конструкцию кумулятивного заряда и создать снаряд, формируемый с помощью взрыва (СФВ) [1]. Такой снаряд формируется из конической облицовки с большим углом раствора в вершине. При взрыве формируется конфигурация снаряда, которая зависит от геометрии взрывчатого вещества, оболочки и инициирующей системы. Форма, скорость и эксплуатационные качества снаряда, формируемого взрывом (СФВ), зависят также от геометрии и материала облицовки, из которого он образуется [2].

Представляют интерес исследование формы облицовки, параметров заряда взрывчатого вещества (длины, отношения длины к диаметру), конфигурации оболочки и выбор способа инициирования взрыва. Свойства материала СФВ при его полете зависят от структуры материала облицовки, а также от технологии изготовления облицовки, оболочки и взрывчатого вещества. Свойствами материала облицовки, обеспечивающими необходимые динамические характеристики СФВ и глубину его проникания в мишень, являются высокие плотность, текучесть, прочность и температура плавления, препятствующая

плавлению при адиабатическом нагревании облицовки [2]. Обычно облицовка изготавливается из стали — относительно недорогого материала, обладающего высокой прочностью и большой плотностью. Однако могут использоваться и другие материалы, если их масса обеспечивает необходимое обжатие облицовки при действии взрывчатого вещества. Важными характеристиками взрывчатого вещества являются его плотность, скорость детонации и энергия взрыва [3]. Материал облицовки должен обеспечивать высокую скорость и большой импульс, что позволяет увеличить глубину проникания СФВ в преграду [4]. Отношение длины снаряда к его диаметру  $L/D$  оказывает существенное влияние на его проникающую способность. Чем больше отношение  $L/D$ , тем больше глубина проникания в мишень [5, 6]. У сплошного СФВ глубина проникания на 10 % больше, чем у СФВ с полостью [7, 8]. Важными характеристиками СФВ, существенно влияющими на глубину его проникания в мишень, являются отношение  $L/D$ , прочность и скорость соударения [9].

Эффективность СФВ существенно зависит от его формы и градиента скорости [10]. Металлофизические свойства материала облицовки оказывают влияние на степень уменьшения градиента скорости, что проявляется в величине работы, затраченной на пластическое деформирование. При не полностью скомпенсированном градиенте скорости происходит непрерывное удлинение ударника и в конечном счете его разделение на фрагменты. Работа, затрачиваемая на пластическое деформирование, ограничивает увеличение длины ударника, стабилизирует его скорость и форму.

Выражение для энергии  $E/V$ , поглощаемой в единице объема материала при квазистатическом пластическом деформировании, записывается в виде [4]

$$\frac{E}{V} = \int \sigma d\varepsilon = \frac{K^* \varepsilon^{n+1}}{n+1},$$

где  $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $n$  — напряжение, деформация и степень экспоненты в законе упрочнения;  $K^*$  — коэффициент жесткости материала. Величина  $E/V$  зависит от динамической прочности и вязкости материала и несущественно зависит от степени экспоненты в законе упрочнения. Чем больше значение отношения  $E/V$ , тем более значительно уменьшаются градиенты скорости без разрушения, вследствие чего материал способен выдерживать высокие взрывные нагрузки [4]. Для обеспечения большого значения отношения  $L/D$  используются взрывчатые вещества, обладающие высокой энергией, например октоген.

В настоящей работе проведены многопараметрическое численное моделирование и экспериментальное исследование материалов облицовок, используемых для получения СФВ.

**1. Схема моделирования.** Формирование и удлинение СФВ моделировались с использованием гидрокода Autodyn-2D, предназначенного для решения гидродинамических задач. В результате определялась эффективность СФВ, изготовленных из различных материалов. Выбор пакета Autodyn-2D обусловлен его универсальностью. Этот код позволяет использовать различные конечно-разностные схемы и конечные элементы. Процессоры этого кода предназначены как для решения различных прямых задач, так и для оптимизации процесса формирования и выбора эксплуатационных свойств изделий [11]. Использование в гидрокоде схемы Эйлера позволяет избежать вырождения ячеек сетки [12]. Преимущества использования гидрокода Autodyn-2D показаны в работах [13–16].

При численном исследовании прочностных свойств используется модель Джонсона — Кука, в которой напряжение текучести выражается через эквивалентную деформацию, скорость пластической деформации и гомологическую температуру [17]:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \varepsilon^*)(1 - (T^*)^m).$$

Здесь выражение в первых скобках представляет собой зависимость напряжения от деформации, выражения во вторых и третьих скобках учитывают влияние скорости деформации и температуры соответственно на напряжения;  $\varepsilon_p$  — эффективная пластическая деформация;  $\varepsilon^*$  — скорость деформации;  $A$ ,  $B$ ,  $n$ ,  $C$ ,  $m$  — константы материала;

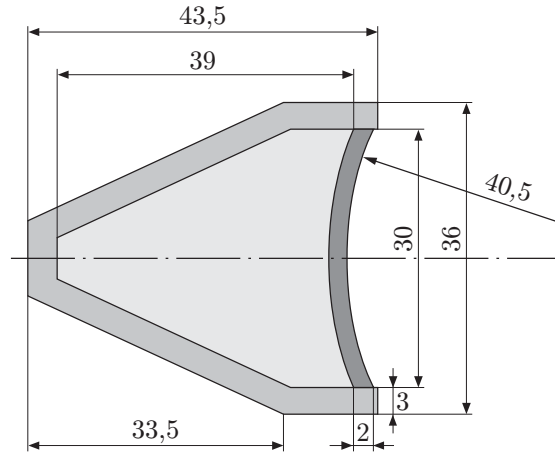


Рис. 1. Геометрия боеголовки СФВ

$T^* = (T - T_{ref}) / (T_{melt} - T_{ref})$  — гомологическая температура;  $T_{ref}$ ,  $T_{melt}$  — отсчетная температура и температура плавления материала соответственно.

В элементе материала тепло генерируется работой, затрачиваемой на пластическое деформирование, при этом температура вычисляется с использованием удельной теплоемкости материала  $c$ . В данной работе для октогена используется уравнение Джонсона — Уилкинса — Ли

$$P = A_{JWL} \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_1}\right) \exp\left(-\frac{R_1}{\eta}\right) + B_{JWL} \left(1 - \frac{\omega\eta}{R_2}\right) \exp\left(-\frac{R_2}{\eta}\right) + \omega\eta\rho_{ref}e,$$

где  $P$  — давление;  $\eta = \rho/\rho_{ref}$ ;  $\rho$  — текущая плотность;  $\rho_{ref}$  — отсчетная плотность;  $e$  — внутренняя удельная энергия;  $A_{JWL}$ ,  $B_{JWL}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\omega$  — константы, зависящие от свойств химически активного взрывчатого вещества [12, 18]. При моделировании используются следующие значения этих констант:  $\rho_{ref} = 1,89 \text{ г/см}^3$ ,  $A_{JWL} = 9,4334 \cdot 10^{-1} \text{ ТПа}$ ,  $B_{JWL} = 8,8053 \cdot 10^{-3} \text{ ТПа}$ ,  $R_1 = 4,7$ ,  $R_2 = 0,9$ ,  $\omega = 0,35$ ,  $e = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ кДж/мм}^3$  [19–21].

Исходные параметры материалов приведены в табл. 1 ( $\rho_{ref}$  — начальная плотность;  $K$  — модуль объемной деформации;  $c$  — удельная теплоемкость;  $G$  — модуль сдвига;  $A$  — предел текучести;  $B$  — константа упрочнения;  $n$  — показатель экспоненты в законе упрочнения;  $C$  — коэффициент скорости деформации;  $m$  — показатель степени множителя, содержащего гомологическую температуру, в выражении для напряжения текучести;  $T_{melt}$  — температура плавления). Для всех материалов облицовки используются модель прочности Джонсона — Кука и линейное уравнение состояния. В данной работе мгновенная деформация, вызванная эрозией, принята равной 2,5. При численном моделировании  $T_{ref} = 300 \text{ К}$ .

**2. Конфигурация СФВ.** Численное моделирование поведения облицовок, изготовленных из различных материалов, выполнено с использованием гидрокода Ansys Autodyn (версия 11.0). Заряд конической формы представляет собой взрывчатое вещество (октоген) с плотностью  $1,89 \text{ г/см}^3$ . Облицовка изготовлена из стали марки 4340. Моделировалось поведение желобообразных облицовок. Отношение длины заряда к его диаметру равно 1,3. Толщина стенки облицовки была постоянной и составляла 2 мм. Диаметр боеголовки равен 36 мм, корпус изготовлен из мягкой стали (рис. 1). Выбрана симметричная конфигурация боеголовки, обеспечивающая осесимметричное распределение пластических деформаций [22]. При моделировании использовался метод инициирования точек.

**3. Экспериментальная установка.** Боеголовка СФВ расположена на расстоянии 5 м от ящика с песком, предназначенного для ее извлечения. Траектория полета, форма и

Таблица 1

## Механические и физические характеристики материалов СФВ

Материал	$\rho_{ref}$ , г/см <sup>3</sup>	$K$ , кПа	$c$ , Дж/(кг·К)	$G$ , кПа	$A$ , кПа	$B$ , кПа	$n$	$C$	$m$	$T_{melt}$ , К
Тантал	16,69	$1,50 \cdot 10^8$	$1,35 \cdot 10^2$	$6,90 \cdot 10^7$	$8,00 \cdot 10^5$	$5,50 \cdot 10^5$	$4,00 \cdot 10^{-1}$	$5,75 \cdot 10^{-2}$	$4,40 \cdot 10^{-1}$	3293
Армко-железо	7,89	$1,64 \cdot 10^8$	$4,52 \cdot 10^2$	$8,00 \cdot 10^7$	$10^6$	$3,80 \cdot 10^5$	$3,10 \cdot 10^{-1}$	$6,00 \cdot 10^{-2}$	$5,50 \cdot 10^{-1}$	1812
Медь	8,96	$1,29 \cdot 10^8$	$3,83 \cdot 10^2$	$4,60 \cdot 10^7$	$10^5$	$2,92 \cdot 10^5$	$3,10 \cdot 10^{-1}$	$2,50 \cdot 10^{-2}$	1,09	1356
Мягкая сталь	7,89	$1,80 \cdot 10^8$	$4,52 \cdot 10^2$	$8,18 \cdot 10^7$	$3,50 \cdot 10^5$	$2,75 \cdot 10^5$	$3,60 \cdot 10^{-1}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$	0,10	1811
Алюминий	2,70	$5,83 \cdot 10^7$	$9,10 \cdot 10^2$	$2,69 \cdot 10^7$	$1,67 \cdot 10^5$	$5,96 \cdot 10^2$	$5,51 \cdot 10^{-1}$	$10^{-3}$	$8,59 \cdot 10^{-1}$	893

Таблица 2

## Характеристики движущихся СФВ, изготовленных из различных материалов, в момент достижения максимальной скорости

Материал	$v$ , м/с	$t$ , мкс	$S$ , мм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T$ , К	$\Delta S$ , мм	$\sigma_{T,max}$ , ТПа	$\Delta V$ , мм	$e$ , кДж/г	$P$ , ТПа	$L/D$
Мягкая сталь	2200	12,05	17,18	7,931	433	$-1,62 \cdot 10^{-2} \div 1,62 \cdot 10^{-3}$	$6,31 \cdot 10^{-4}$	$4,50 \cdot 10^{-3}$	0,219	$8,09 \cdot 10^{-4}$	0,1650
Медь	2050	10,77	11,78	9,045	405	$-9,03 \cdot 10^{-3} \div 8,45 \cdot 10^{-2}$	$3,85 \cdot 10^{-4}$	$9,45 \cdot 10^{-4}$	0,172	$1,22 \cdot 10^{-3}$	0,1103
Армко-железо	2160	10,75	12,78	7,960	488	$-9,13 \cdot 10^{-3} \div 1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-3}$	$8,91 \cdot 10^{-3}$	0,227	$1,46 \cdot 10^{-3}$	0,1280
Тантал	1310	12,15	8,58	16,830	568	$-1,79 \cdot 10^{-2} \div 1,46 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$8,20 \cdot 10^{-3}$	0,092	$1,23 \cdot 10^{-3}$	0,0920
Алюминий	3640	10,02	19,48	2,824	462	$-6,84 \cdot 10^{-2} \div 3,41 \cdot 10^{-3}$	$3,61 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-2}$	0,897	$8,21 \cdot 10^{-4}$	0,1761

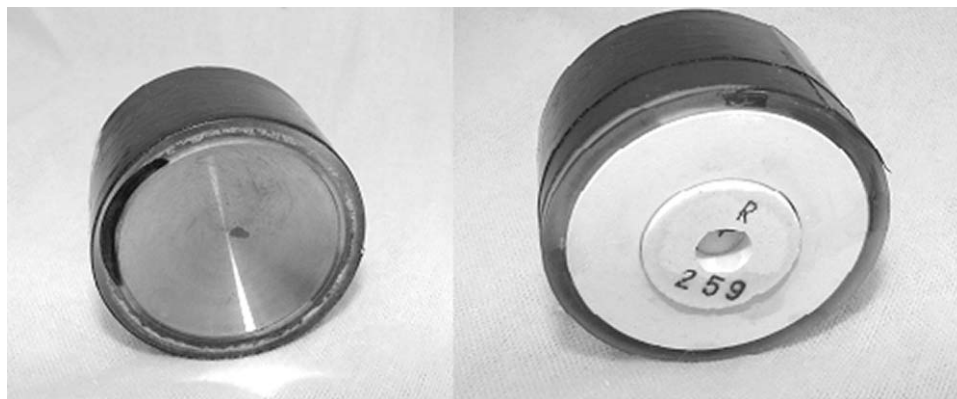


Рис. 2. Боеголовка СФВ в сборке

отношение  $L/D$  СФВ фиксировались высокоскоростной камерой. СФВ в сборке показан на рис. 2.

**4. Результаты исследования и их обсуждение.** Проведено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных о градиенте скорости и скорости разрушения материала облицовки. Определялись также внутреннее давление, предел текучести материала, внутренняя энергия, плотность, температура и отношение  $L/D$  СФВ.

4.1. *Параметры материала СФВ в момент достижения его максимальной скорости.* Исходные параметры материалов приведены в табл. 1. В литературе отсутствуют сведения о параметрах таких материалов облицовок, как мягкая сталь, медь (Cu), армко-железо (Fe), тантал (Ta) и алюминий (Al), в момент достижения максимальной скорости. В табл. 2 приведены значения этих параметров для различных материалов ( $v$  — скорость;  $t$  — время;  $S$  — длина пути;  $\rho$  — плотность;  $T$  — температура;  $\Delta S$  — отклонение от траектории;  $\sigma_{T\max}$  — максимальное напряжение текучести;  $\Delta V$  — степень сжатия;  $e$  — внутренняя энергия;  $P$  — давление). Наибольшие длина пути, степень сжатия, внутренняя энергия и отношение  $L/D$  имеют место для СФВ из алюминия. Это обусловлено такими характеристиками алюминия, как податливость, низкая плотность, низкая температура плавления и атомная структура (атомы упакованы менее плотно, чем у других материалов). Начальное сжатие алюминия в основном вызвано действием ударной волны, возникающей при взрыве, что является следствием малой плотности алюминия и сравнительно слабых межатомных связей. Это приводит к растяжению СФВ в осевом направлении. В результате получается достаточно длинный снаряд с большим отношением  $L/D$ .

Для СФВ из тантала скорость и длина пути являются наименьшими при наибольшем времени, затраченном на достижение максимальной скорости, и наибольшем изменении плотности. В результате имеет место наибольшее значение температуры, что обусловлено малым значением показателя степени в законе теплового разупрочнения, большой плотностью и большим значением показателя экспоненты в законе упрочнения.

Отклонение от траектории полета является наименьшим для СФВ из мягкой стали и наибольшим для СФВ из меди, что обусловлено характеристиками этих материалов. Напряжение текучести и давление в СФВ наибольшие для облицовок из армко-железа.

Форма СФВ в момент достижения максимальной скорости показана на рис. 3. СФВ из материалов с малой плотностью имеют криволинейную форму, а форма СФВ из материалов с большой плотностью близка к прямолинейной. Наиболее существенное изменение давления в центральной части СФВ из мягкой стали и алюминия отмечено в [23]. Результаты, полученные в настоящей работе, позволяют сделать вывод о том, что скорость изменяется внутри облицовок, изготовленных из различных материалов, причем наибольшая скорость имеет место в центральной части.

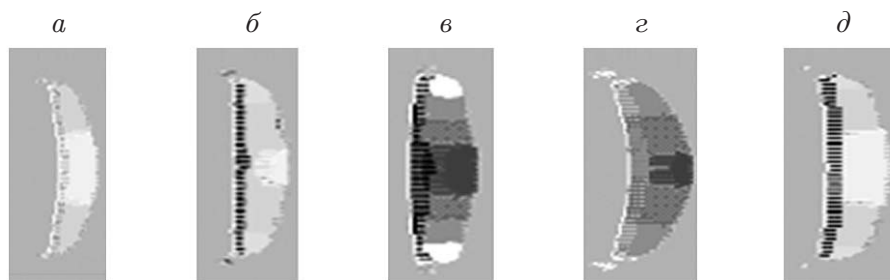


Рис. 3. Форма СФВ в момент достижения максимальной скорости:  
*а* — мягкая сталь; *б* — медь; *в* — тантал; *г* — алюминий; *д* — армко-железо

4.2. *Параметры материалов СФВ в режиме установившейся скорости.* Значения параметров материалов СФВ в режиме установившейся скорости приведены в табл. 3. В этом режиме наибольшую скорость имеет СФВ, изготовленный из алюминия. Следовательно, СФВ из алюминия более эффективны, чем СФВ из металлов с большей плотностью. Отклонения от траектории полета, внутренняя энергия и изменение плотности также являются наибольшими для СФВ из алюминия, что обусловлено его малыми жесткостью и плотностью, низкой температурой плавления и внутриатомной структурой. Для СФВ из алюминия время выхода на установившийся режим и длина пути при этом наименьшие.

СФВ из тантала имеет больший диаметр, вследствие чего в мишени образуется кратер большего размера. Диаметр СФВ из армко-железа близок к диаметру СФВ из тантала. Поэтому СФВ из армко-железа предпочтительнее вследствие сравнительно небольшой стоимости армко-железа и простоты изготовления из него снаряда. Температура внутри СФВ из тантала наибольшая, что может приводить к образованию горячих фрагментов.

В режиме установившейся скорости наибольшее отношение  $L/D$  у СФВ из меди, поэтому такой снаряд имеет бóльшую глубину проникания в мишень. СФВ из мягкой стали наиболее надежен и устойчив, поскольку имеет наименьшие отклонения от траектории полета. Этот материал может заменить железо в составном лайнере СФВ, при изготовлении которого используются тантал для увеличения глубины проникания и армко-железо в качестве стабилизирующей основы [2]. Наибольшие напряжения текучести имеют место в облицовке из армко-железа.

Все рассмотренные параметры определялись в режиме установившейся скорости и практически не изменялись до момента столкновения с мишенью. Формы СФВ, полученные в экспериментах и в результате численного моделирования, приведены на рис. 4. Видно, что результаты численного моделирования и экспериментальные данные хорошо согласуются. Среди сплошных СФВ более предпочтительными являются СФВ из мягкой стали и меди, в то время как среди полых — СФВ из тантала, алюминия и армко-железа. Следует отметить, что глубина проникания сплошных СФВ из мягкой стали и меди на 10 % больше.

4.3. *Распределение скорости.* На рис. 5 представлена зависимость скорости от времени для СФВ из различных материалов. Видно, что скорость возрастает до максимального значения, а затем убывает до установившегося значения. Значения максимальной и установившейся скоростей СФВ зависят от характеристик материала, из которого изготовлена облицовка.

СФВ из тантала имеет наименьшие значения максимальной и установившейся скоростей, причем время выхода на установившийся режим наибольшее. СФВ из алюминия имеет наибольшие значения максимальной и установившейся скоростей, при этом выход на установившийся режим происходит в течение малого промежутка времени. Таким образом, плотность материала пропорциональна скорости СФВ.

Таблица 3

Характеристики движущихся СФВ, изготовленных из различных материалов, в установившемся режиме

Материал	$v$ , м/с	$t$ , мкс	$S$ , мм	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T$ , К	$\Delta S$ , мм	$\sigma_{Tmax}$ , ТПа	$\Delta V$ , мм	$e$ , кДж/г	$P$ , ТПа	$L/D$
Мягкая сталь	1870	55,43	190,10	7,900	448	$0 \div 5,63 \cdot 10^{-4}$	$5,14 \cdot 10^{-4}$	$5,01 \cdot 10^{-4}$	0,1990	$9,01 \cdot 10^{-5}$	1,054
Медь	1700	60,44	189,00	8,963	449	$-1,58 \cdot 10^{-3} \div 9,89 \cdot 10^{-4}$	$3,30 \cdot 10^{-4}$	$3,16 \cdot 10^{-4}$	0,1690	$4,08 \cdot 10^{-5}$	1,646
Армко-железо	1820	50,82	189,00	7,891	503	$-2,04 \cdot 10^{-3} \div 0$	$8,58 \cdot 10^{-4}$	$1,66 \cdot 10^{-4}$	0,2090	$2,70 \cdot 10^{-5}$	0,913
Тантал	1080	62,24	164,90	16,690	619	$-3,55 \cdot 10^{-3} \div 0$	$7,62 \cdot 10^{-4}$	$5,58 \cdot 10^{-7}$	0,0946	0	0,777
Алюминий	3190	36,11	137,90	2,785	477	$-3,52 \cdot 10^{-3} \div 5,67 \cdot 10^{-3}$	$3,65 \cdot 10^{-4}$	$1,59 \cdot 10^{-6}$	0,8100	0	1,314

Таблица 4

Результаты численного моделирования и экспериментальные данные

Материал	$t_{st}$ , мкс		$v_{max}$ , м/с		$v_{st}$ , м/с		$a$ , м/с <sup>2</sup>		$L/D$						
	Расчет	Эксперимент	$\delta$ , %	Расчет	Эксперимент	$\delta$ , %	Расчет	Эксперимент	$\delta$ , %	Расчет	Эксперимент				
Алюминий	26,22	25,5	2,8	3640	3565	2,1	3190	3152	1,20	17,24	16,46	4,6	1,314	1,25	5,1
Мягкая сталь	31,33	30,8	1,7	2200	2145	2,5	1871	1845	1,40	7,71	7,10	8,5	1,054	0,90	17,0
Армко-железо	40,72	39,9	2,1	2050	2005	2,2	1820	1806	0,77	8,48	8,00	6,0	0,913	0,80	14,0
Медь	49,72	47,9	3,8	2160	2100	2,8	1700	1676	1,40	7,04	6,50	8,3	1,646	1,50	9,7
Тантал	50,50	49,6	1,8	1310	1265	3,5	1080	1064	1,50	4,52	4,00	13,0	0,777	0,65	19,5

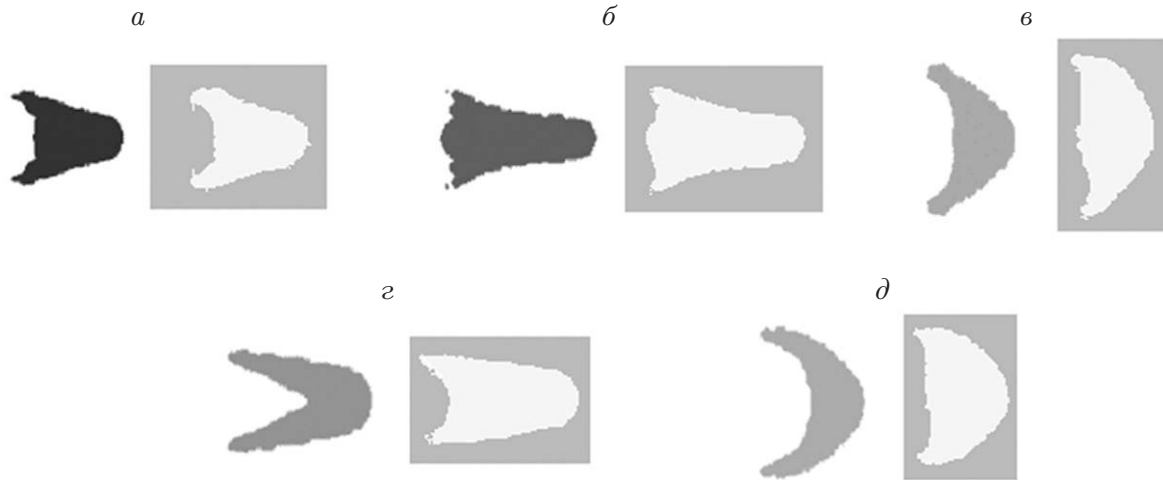


Рис. 4. Экспериментальная (слева) и полученная при численном моделировании (справа) формы СФВ в установившемся режиме:

*a* — мягкая сталь; *б* — медь; *в* — тантал; *г* — алюминий; *д* — армко-железо

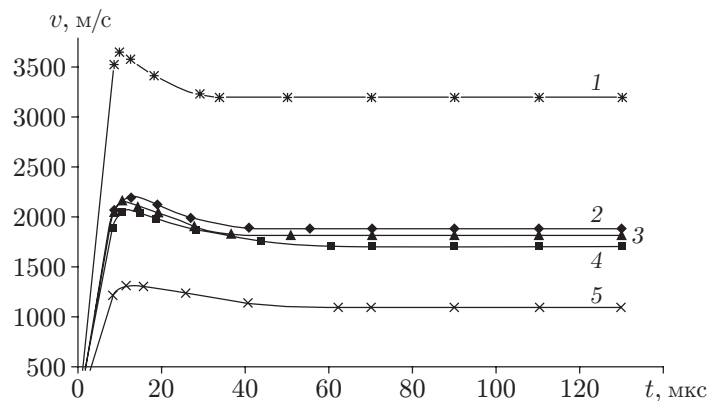


Рис. 5. Зависимость скорости СФВ от времени:

1 — алюминий; 2 — мягкая сталь; 3 — армко-железо; 4 — медь; 5 — тантал

В табл. 4 приведены время  $t_{st}$  с момента достижения максимальной скорости до выхода на установившийся режим, максимальные  $v_{max}$  и установившиеся  $v_{st}$  значения скорости, замедление  $a$ , отношение  $L/D$  для СФВ из различных материалов ( $\delta$  — погрешность). Время достижения установившейся скорости прямо пропорционально плотности материала. Для СФВ из тантала наибольшее различие экспериментальных и расчетных значений максимальной скорости СФВ составляет 3,5 %, установившейся скорости — 1,5 %.

Наибольшее различие расчетных и экспериментальных значений замедления имеет место для облицовки из тантала и составляет 13 %. Для СФВ из меди отношение  $L/D$  наибольшее, для СФВ из тантала — наименьшее. Максимальное различие значения этого отношения, полученного при численном моделировании, и экспериментального значения для СФВ из меди составляет 9,7 %.

Замедление СФВ обратно пропорционально плотности материала, из которого изготовлена облицовка. Другие характеристики материала также влияют на замедление (рис. 6). Несмотря на то что эти материалы имеют приблизительно одинаковую плотность, скорость СФВ из армко-железа уменьшается быстрее, чем скорость СФВ из мягкой



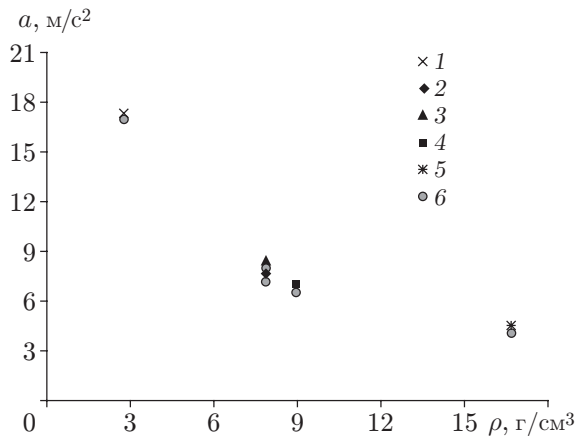


Рис. 6

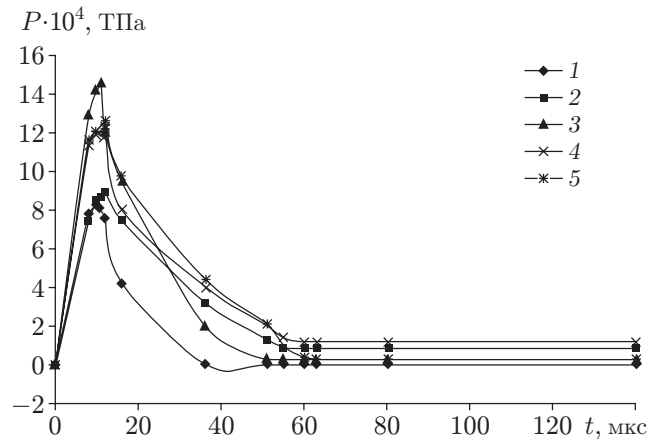


Рис. 7

Рис. 6. Зависимость замедления облицовки от плотности ее материала:  
 1–5 — результаты расчетов (1 — алюминий, 2 — мягкая сталь, 3 — армко-железо, 4 — медь, 5 — тантал); 6 — экспериментальные данные для соответствующих материалов

Рис. 7. Зависимость давления в материале облицовки от времени:  
 1 — алюминий; 2 — мягкая сталь; 3 — армко-железо; 4 — медь; 5 — тантал

стали. Это объясняется тем, что у армко-железа напряжение текучести, константа в законе упрочнения, константа в законе, определяющем зависимость напряжения от скорости деформации, и температура плавления больше.

4.4. *Изменение характеристик материала облицовки вдоль траектории ее движения.* При движении СФВ вдоль траектории его скорость, давление, плотность, температура и внутренняя энергия изменяются. На рис. 7 показано изменение давления в материале облицовки. Видно, что давление возрастает до максимального значения, а затем уменьшается до некоторого постоянного значения. Установившееся значение давления пропорционально плотности материала.

В табл. 5 приведены максимальные значения давления, внутренней энергии, плотности и температуры, возникающие вследствие воздействия ударной волны. Алюминий имеет меньшую жесткость, плотность и менее плотную упаковку атомов по сравнению с другими материалами, поэтому у него наибольшая внутренняя энергия при воздействии ударной волны одной и той же силы. У тантала изменение внутренней энергии наименее значительное, что обусловлено наибольшей плотностью и плотноупакованной атомной структурой. Внутренняя энергия СФВ обратно пропорциональна плотности материала облицовки, которая зависит от его свойств, в частности от начальной плотности и жесткости (внутриатомных связей).

Таблица 5

Максимальное изменение параметров материалов облицовки

Материал	$P_{\max} \cdot 10^4, \text{ Па}$	$e_{\max}, \text{ кДж/г}$	$\rho_{\max}, \text{ г/см}^3$	$T_{\max}, \text{ К}$
Алюминий	8,206	0,8970	0,040	177
Мягкая сталь	8,910	0,2190	0,036	148
Армко-железо	14,600	0,2270	0,071	203
Медь	12,190	0,1720	0,088	151
Тантал	12,300	0,0946	0,141	319

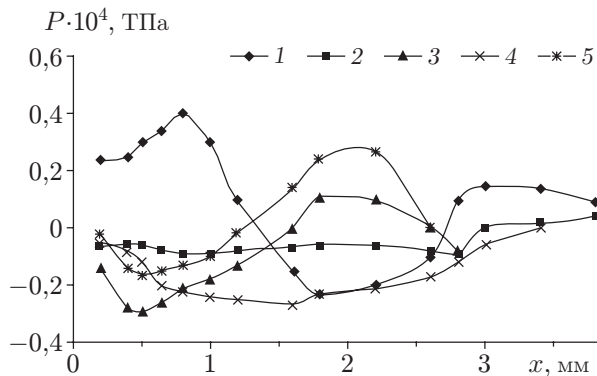


Рис. 8

Рис. 8. Распределение давления внутри СФВ по его длине:

1 — мягкая сталь; 2 — медь; 3 — армко-железо; 4 — алюминий; 5 — тантал

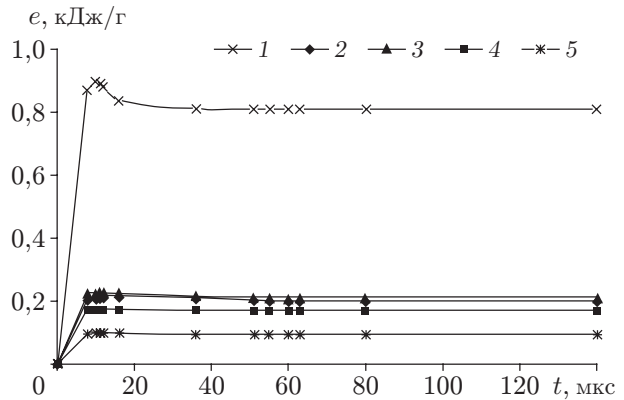


Рис. 9

Рис. 9. Зависимость внутренней энергии материала облицовки от времени:

1 — алюминий; 2 — мягкая сталь; 3 — армко-железо; 4 — медь; 5 — тантал

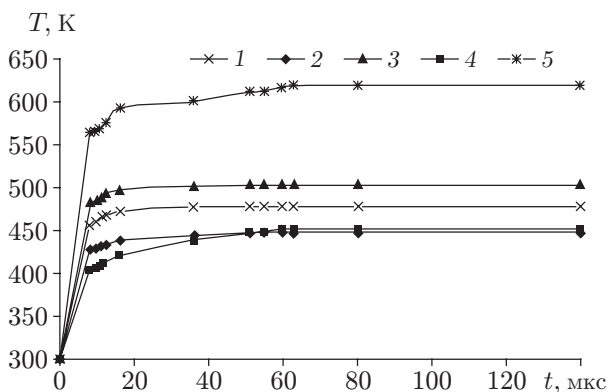


Рис. 10

Рис. 10. Зависимость температуры материала облицовки от времени:

1 — алюминий; 2 — мягкая сталь; 3 — армко-железо; 4 — медь; 5 — тантал

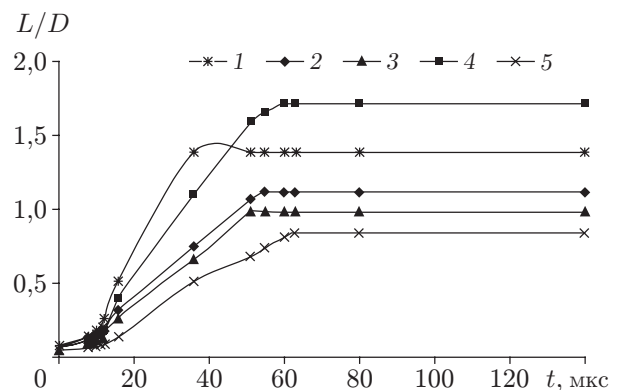


Рис. 11

Рис. 11. Зависимость отношения  $L/D$  облицовки от времени:

1 — алюминий; 2 — мягкая сталь; 3 — армко-железо; 4 — медь; 5 — тантал

Можно предположить, что с увеличением плотности материала плотность упаковки атомов увеличивается. При этом каждый атом более активно взаимодействует с соседними атомами, передавая им свою энергию, что в результате приводит к повышению температуры. Это предположение подтверждается поведением СФВ (максимальное изменение температуры имеет место для тантала, у которого изменение плотности максимальное).

На рис. 8–11 представлены распределения давления, внутренней энергии, температуры внутри СФВ и отношения  $L/D$ . Максимальные флуктуации давления имеют место для СФВ из мягкой стали, в то время как для СФВ из меди они минимальные. Существенное изменение внутренней энергии наблюдается для материалов с малой плотностью (алюминий, мягкая сталь, армко-железо). Для всех материалов значение отношения  $L/D$  сначала увеличивается, а затем остается постоянным в установившемся режиме.

**Заключение.** Исследованы характеристики ряда материалов (мягкой стали, меди, тантала, алюминия и армко-железа), применяемых для получения СФВ. Проведено сравнение формы, скорости, давления, плотности, внутренней энергии, температуры и отношения длины к диаметру для СФВ, изготовленных из различных материалов. Все эти параметры определены в момент достижения СФВ максимальной скорости и в установившемся режиме.

В момент достижения облицовкой максимальной скорости из всех материалов алюминий наиболее быстро реагирует на воздействие ударной волны, в результате чего имеют место наибольшие скорость, длина пути, сжатие, плотность, внутренняя энергия и отношение  $L/D$ . Это обусловлено малыми жесткостью и плотностью, низкой температурой плавления и внутриатомной структурой алюминия. Наибольший градиент скорости имеет место в центральной части СФВ. В установившемся режиме СФВ из алюминия имеет наибольшие скорость, отклонение от траектории, внутреннюю энергию и плотность. СФВ из алюминия наиболее неустойчив при полете. СФВ из тантала имеет наибольший диаметр, что приводит к образованию наибольшего кратера в мишени. СФВ из армко-железа имеет приблизительно такой же диаметр, как и СФВ из тантала, поэтому он более предпочтителен вследствие относительно невысокой стоимости материала и простоты изготовления из него снаряда. Температура внутри СФВ из тантала наибольшая, что может привести к разделению его на фрагменты. В установившемся режиме отношение  $L/D$  у СФВ из меди наибольшее, что обеспечивает максимальную глубину проникания. СФВ из мягкой стали наиболее устойчив, поэтому этот материал может заменить армко-железо в составных лайнерах СФВ (тантал используется для увеличения глубины проникания, а армко-железо — в качестве стабилизирующей основы).

Среди сплошных СФВ более предпочтительными являются СФВ из мягкой стали и меди, в то время как среди полых — СФВ из тантала, алюминия и армко-железа. Учитывая влияние других параметров, можно сделать вывод, что глубина проникания сплошных СФВ из мягкой стали и меди больше.

Время достижения установившегося режима прямо пропорционально плотности материала, из которого изготовлена облицовка. Замедление облицовки обратно пропорционально плотности.

Авторы выражают благодарность А. Хайяту, Г. Акраму, Ш. А. Рауфи (Al-Technique Corporation of Pakistan) и М. Гибсону (Крэнфилдский университет) за помощь в проведении численного моделирования и экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Arshad M.** Design and simulate explosively formed projectiles (EFPs): MS Thesis. Islamabad (Pakistan): Pakistan inst. engng appl. sci., 2004.
2. **Weimann K., Blache A.** Explosively formed projectile with tantalum penetrator and armco iron stabilization base // 18th Intern. symp. on ballistics, San Antonio, 15–19 Nov. 1999. S. 1., 1999. P. 603–608.
3. **Cullis I. G.** Experiments and modeling in dynamic materials properties: Explosively formed projectile research in a European collaborative forum // 13th Intern. symp. on ballistics, Stockholm, 1–3 June, 1992. S. 1., 1992. P. 457–464.
4. **Sharma V., Kishore P., Singh S.** An analytical approach for modeling EFP formation and estimation of confident effect on velocity // 16th Intern. symp. on ballistics, San Francisco, 23–28 Sept. 1996. S. 1., 1996. P. 585–595.
5. **Lanz W., Odermatt W.** Penetration limits of conventional large caliber anti tank guns/kinetic energy projectiles // 13th Intern. symp. on ballistics, Stockholm, 1–3 June 1992. S. 1., 1992. P. 225–233.

6. **Bjerke T. W., Silsly G. F., Scheffler D. R.** Yawed long rod armour penetration // Intern. J. Impact Engng. 1992. V. 12. P. 281–292.
7. **Weimann K.** Performance of Ta, Cu and Fe EFPs against steel targets // 15th Intern. symp. on ballistics, Jerusalem, May 1995. S. 1., 1995. V. 2. P. 399–404.
8. **Rondot F.** Performance of Ta EFP simulants // 17th Intern. symp. on ballistics. S. 1., 1998. V. 3. P. 81–88.
9. **Rondot F.** Terminal ballistics of the EFPs-A numerical comparative study between hollow and solid simulants // 19th Intern. symp. on ballistics, Interlaken, 7–11 May 2001. S. 1., 2001. P. 455–461.
10. **Gazeaud G.** Explosively formed projectile: Optimization // 13th Intern. symp. on ballistics, Stockholm, 1–3 June 1992. S. 1., 1992. P. 473–479.
11. **Janzon B., Burman N., Forss J., et al.** EFP modeling by numerical continuum dynamics on personal computers — A comparison between PC-Dyna2D, ZEUS and Autodyn-2D // 13th Intern. symp. on ballistics, Stockholm, 1–3 June 1992. S. 1., 1992. P. 457–464.
12. **Hermann J. W.** Ammunition development and engineering. New Jersey: Directorate US Army. S. a. 07801.
13. **Hussain G., Sanaullah K.** Simulation studies of explosive formed projectiles (EFPs) // J. Engng Appl. Sci. 2009. V. 28, N 2. P. 11–22.
14. **Davison D., Nordell A.** Hydrocode analysis of acceptable limits on fabrication of EFP liners // 15th Intern. symp. on ballistics, Jerusalem, May 1995. S. 1., 1995. P. 235–242.
15. **Wijk G., Amiree R.** Simulation of high velocity impact // 21st Intern. symp. on ballistics, 19–23 Apr. 2004. S. 1., 2004. P. 838–844.
16. **Karlsson H. E. V.** Computer simulations of shaped charge jet fragmentation // 20th Intern. symp. on ballistics, 23–27 Sept., 2002. S. 1., 2002. P. 557–564.
17. **Bucharr J., Rolc S., Pechacek J.** Numerical simulation of the long rod interaction with flying plate // 21st Intern. symp. on ballistics, Adelaide (Australia), 19–23 Apr. 2004. S. 1., 2004. P. 196–199.
18. **Rondot F., Berner C.** Performance of aerodynamically optimized EFP stimulants // 17th Intern. symp. on ballistics, Midrand (South Africa). S. 1., 1998. V. 3. P. 225–232.
19. **Pappu S., Murr L. E.** Hydrocode and micro-structural analysis of explosively formed penetrators // J. Material Sci. 2002. V. 37, N 2. P. 233–248.
20. **Hussain G., Sanaullah K.** Gradient valued profiles of EFP's liner materials with modified Johnson Cook model // NUST J. Engng Appl. Sci. 2009. V. 2. P. 78–87.
21. **Hussain G., Sanaullah K.** Computer simulation profiles and velocity decaying rates of explosively formed projectiles // 25th Intern. symp. on ballistics, Beijing (China), 2010. S. 1., 2010. V. 1. P. 714–727.
22. **Macmahon J., Church P., Filer M., et al.** Use of hydrocode simulations in the design of tantalum EFPs // 18th Intern. symp. on ballistics, San Antonio, 15–19 Nov. 1999. S. 1., 1999. P. 520–527.
23. **Almond R. J., Murray S. G.** Projectile attack of surface scattered munitions: Prompt shock finite element models and live trials // Propellants, Explosives Pyrotechnics. 2006. V. 31, N 2. P. 83–88.

*Поступила в редакцию 28/III 2011 г.,  
в окончательном варианте — 9/VIII 2011 г.*