

УДК 623.4.082.6

ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКИ НА ФОРМУ ПЕНЕТРАТОРОВ, ФОРМИРУЕМЫХ ВЗРЫВОМ

В.-Б. Ли, В.-Б. Ли, С.-М. Ван, Х. Чжоу

Нанкинский научно-технологический университет, 210094 Нанкин, Китай, njstlwb@163.com

С использованием программного пакета LS-DYNA исследовано влияние плотности и относительного удлинения материалов оболочки на форму пенетраторов. Сравнивались характеристики оболочек из алюминия, чистого железа, меди, тантала и вольфрама при одинаковых объемах или массах. Из материалов с хорошим динамическим удлинением и средней плотностью, таких как чистое железо и медь, лучше формируются взрывом различные пенетраторы (в виде компактного ударного ядра и в форме удлиненного стержня). Рассмотрены характеристики пенетраторов из алюминия, стали 20 и меди. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными путем рентгенографирования.

Ключевые слова: материал оболочки, ударное ядро, удлиненный пенетратор, плотность, удлинение, численное моделирование.

DOI 10.15372/FGV20150316

ВВЕДЕНИЕ

Многорежимные боеголовки представляют большой интерес [1–7]. Большинство исследований в этой области сосредоточено на формировании пенетраторов, соответствующих требуемым задачам, при использовании зарядов одной и той же структуры. Это может быть кумулятивная струя, которая разрушает хорошо бронированные цели на коротком расстоянии; удлиненный, формируемый взрывом ударник (далее — удлиненный ударник), разрушающий броню на средних дистанциях; компактный, формируемый взрывом ударник (далее — ударное ядро), который обладает устойчивым полетом и может поражать легкобронированные цели на большом расстоянии; заряды, которые дают осколки, летящие в нужном направлении. Структура заряда, выбор материала лайнера, способ инициирования и контроль формы ударной волны играют важную роль в формировании пенетраторов [8, 9]. В данной работе мы исследовали влияние материала лайнера при одних и тех же параметрах заряда.

При одной и той же структуре лайнера формирование пенетраторов может идти по-разному в зависимости от плотности, пластич-

ности и прочности материала. Эти свойства влияют также на пробивную способность пенетратора. Авторы [10] экспериментально и путем моделирования влияния неустойчивости Рэлея — Тейлора на образование кумулятивной струи показали, что лайнер малой толщины с большой плотностью и низкой прочностью материала более чувствителен к воздействию неустойчивости, чем лайнер большой толщины и высокой прочности, а лайнер с низкой плотностью, такой, например, как у алюминия, не подвержен влиянию неустойчивости. В работе [11] установлено, что прочность лайнера существенно влияет на скорость головной части струи. В [12] исследовано образование ударного ядра из порошка титана и получено ядро в форме длинного стержня. Изучение лайнера из металлического стекла (Vitreloy 106) [13] показало, что он ведет себя так же, как лайнер из прессованного металлического порошка. В работе [14] в качестве материала лайнера использовано оксидное стекло, формируемая из него струя не разрушается и не образует перетяжек.

Влияние материала лайнера на формирование одиночного пенетратора изучалось многими исследователями. Так, в работе [15] показано, что железо и вольфрам дают пенетраторы с самой высокой и самой низкой скоростями соответственно. Авторы [16] показали, что из серебра, железа и меди формируются ударные ядра с большим отношением длины к диаметру, чем в случае тантала. В [17] эксперимен-

© Li Weibing, Li Wenbin, Wang Xiaoming, Zhou Huan, 2015.

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, 210094 Nanjing, China.

тально исследовано формирование кумулятивных струй из меди, никеля, алюминия, серебра, молибдена, вольфрама, тантала, железа и урана, установлены их характеристики. В [18] обнаружено, что лайнеры из материала с низкой температурой плавления (серебро, титан, цирконий и обедненный уран) формируют более пластичную струю, которая дольше не разрушается, чем медная. В работе [19] изучали формирование кольцевого пенетратора из железа, алюминия, тантала и свинца. Однако мы не нашли в литературе данных о выборе материала лайнера для формирования пенетраторов различной формы при одной и той же структуре заряда.

В данной работе исследование влияния материала лайнера (алюминий, железо, медь, тантал и вольфрам) на образование пенетраторов проводилось с использованием пакета LS-DYNA. Выяснилось, что плотность и относительное удлинение (далее — удлинение) материала влияют на скорость головной части пенетратора и отношение длины к диаметру. Для сопоставления результатов моделирования формирования пенетраторов с экспериментом использованы лайнеры из меди, стали 20 и алюминия.

1. МАТЕРИАЛ ЛАЙНЕРА И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

1.1. Выбор материала лайнера

Согласно гидродинамической теории пробивания [20, 21] для формирования удлиненного устойчивого пенетратора материал лайнера должен обладать большой плотностью, высокой скоростью звука, хорошими теплопроводностью и динамическим удлинением, мелкозернистой структурой и низкой температурой рекристаллизации. Для сопоставления был выбран алюминий, поскольку его плотность низка и он не подвержен влиянию неустойчивости при формировании кумулятивной струи [10]. В качестве материала лайнера использовали ряд металлов. Выбор чистого железа обусловлен его хорошей динамической пластичностью, высокой скоростью звука и невысокой стоимостью [15]. Медь традиционно используется для кумулятивных зарядов. У нее высокие плотность и скорость звука, средняя температура плавления, хорошая пластичность и приемлемая прочность, поэтому формирующаяся струя

отличается хорошей пластичностью, не разрушается и не испаряется легко [17]. Тантал из-за его высокой плотности (16.6 г/см^3) и хороших динамических характеристик [12, 22] используется в основном как материал для формирования ударных ядер. Вольфрам — новый перспективный материал вследствие высокой плотности (19.3 г/см^3) и умеренной скорости звука (4.03 км/с при нормальной температуре) [23]. Основные свойства этих материалов могут быть найдены в справочниках, см., например, [24].

1.2. Обоснование расчетной модели

Структура заряда показана на рис. 1. Форма лайнера представляет собой комбинацию дуги и конуса. Диаметр заряда 100 мм, угол лайнера 145° , радиус кривизны при его вершине 45 мм. Толщина лайнера 3.8 мм. При иницировании заряда в точке O формируется ударное ядро, а при кольцевом иницировании на радиусе 35 мм (A) — удлиненный ударник. Вследствие осевой симметрии структуры проводили трехмерный расчет одной четверти заряда. Взрывчатое вещество (ВВ), лайнер и воздух описывали в рамках эйлерова подхода. Для описания взаимодействия между ВВ, лайнером, воздухом и оболочкой использовали специальный алгоритм [8, 9].

Лайнер и оболочку описывали моделью Джонсона — Кука [25], динамику взрывного процесса — уравнением состояния Грюнайзена. В модели Джонсона — Кука напряжение пластического течения выражается в виде

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^{pn})(1 + C \ln \bar{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}),$$

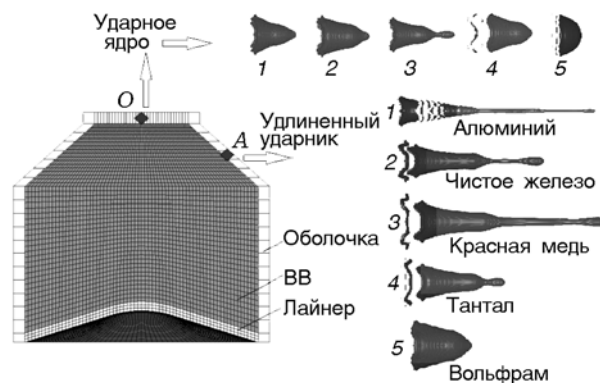


Рис. 1. Структура кумулятивного заряда и форма пенетраторов при различных материалах лайнера

Таблица 1

Параметры модели Джонсона — Кука, использованные для материалов лайнера

Материал	ρ , г/см ³	A , ГПа	B , ГПа	n	C	m
Алюминий	2.77	0.265	0.426	0.34	0.015	1
Чистое железо	7.86	0.175	0.38	0.32	0.06	0.55
Медь	8.96	0.09	0.292	0.31	0.025	1.09
Тантал	16.6	0.3424	0.2635	0.3148	0.057	0.8836
Вольфрам	17.6	1.506	0.177	0.12	0.008	1

где $\bar{\varepsilon}^p$ — эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\varepsilon}^* = \bar{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_0$ — безразмерная скорость пластической деформации, $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ с}^{-1}$; $T^* = (T - T_{room}) / (T_{melt} - T_{room})$ — относительная температура, T_{room} — температура окружающей среды, T_{melt} — плавления; A — предел текучести; B — коэффициент деформационного упрочнения; C — коэффициент; n и m — константы. Параметры модели Джонсона — Кука, использованные для материалов лайнера, представлены в табл. 1 [26–28].

Деформация при разрушении дается в модели Джонсона — Кука выражением

$$\varepsilon^f = [D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*][1 + D_4 \ln \varepsilon^*][1 + D_5 T^*],$$

где $\sigma^* = p / \sigma_{eff}$ — отношение давления к эффективному напряжению. Разрушение происходит, когда параметр поврежденности $D_i = \sum (\Delta \bar{\varepsilon}^p / \varepsilon^f)$ достигает значения 1.

В расчетах использовалось взрывчатое вещество 8701 с плотностью заряда 1.713 г/см³ и скоростью детонации 7980 м/с. Для его описания применяли уравнение состояния Джонса — Уилкинса — Ли. Воздух описывали линейным полиномиальным уравнением состояния. Численная процедура детально представлена в работах [8, 9].

2. ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ЛАЙНЕРА ПРИ ОДНОМ И ТОМ ЖЕ ЕГО ОБЪЕМЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПЕНЕТРАТОРОВ

Результаты моделирования формы пенетраторов при различных способах иницирования и различных материалах лайнера, но при одном и том же его объеме показаны на рис. 1. Лайнеры из всех пяти материалов формируют ударное ядро. Алюминий, чистое железо, медь и тантал дают пенетраторы подходящих

форм и параметров. Вольфрам образует полусферическое ударное ядро с малыми скоростью и отношением длины к диаметру. Удлиненные ударники, сформированные танталом и вольфрамом, имеют меньшую скорость и отношение длины к диаметру, чем сформированные из алюминия, чистого железа и меди — материалов, которые лучше тянутся в процессе формирования.

2.1. Влияние плотности материалов лайнера

В соответствии с законом сохранения импульса и теорией мгновенной детонации скорость ударного ядра дается выражением [29]

$$v = \frac{\rho_e D}{\rho \sqrt{k^2 - 1}} S(x), \quad (1)$$

где ρ — плотность материала лайнера, k — показатель политропы ВВ, ρ_e — плотность ВВ, D — скорость детонации, $S(x)$ — интегральная функция, зависящая от формы лайнера, x — изменяемый параметр лайнера. Из (1) следует, что скорость ударного ядра обратно пропорциональна плотности материала лайнера.

На рис. 2 представлены результаты моделирования скорости пенетратора (v) и отношения его длины к максимальному диаметру (L/d) в зависимости от плотности материалов лайнера. Длину и максимальный диаметр определяли до начала разрушения. Видно, что скорость головной части пенетратора уменьшается с ростом плотности материалов лайнера, что согласуется с теоретической формулой. При увеличении плотности от 2.77 до 17.6 г/см³ скорость ударного ядра уменьшается на 66.3 %, а скорость головной части удлиненного ударника — на 74.8 %. Значения L/d для ударного ядра не описываются явно какой-либо характерной кривой, в то время как этот параметр для удлиненного ударника линейно

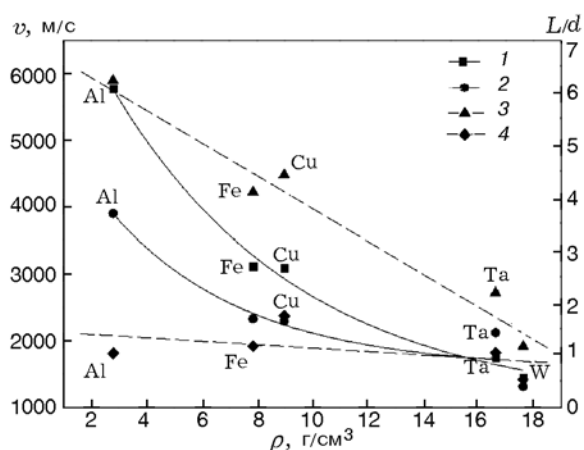


Рис. 2. Зависимости параметров пенетраторов от плотности материалов лайнера в момент времени $t = 160$ мкс:

1 — скорость головной части удлиненных ударников, 2 — скорость головной части ударных ядер, 3 — отношение длины к диаметру удлиненных ударников, 4 — отношение длины к диаметру ударных ядер

уменьшается с ростом плотности. При использовании вольфрама в качестве материала лайнера отношение L/d уменьшается в 4.3 раза по сравнению с алюминием.

Аппроксимирующие уравнения для значений v и L/d на рис. 2 имеют следующий вид: ударное ядро:

$$v = 4061 \exp(-\rho/4.94) + 1581,$$

$$L/d = 1.46 - 0.03\rho;$$

удлиненный ударник:

$$v = 7125 \exp(-\rho/6.81) + 1025,$$

$$L/d = 6.98 - 0.31\rho.$$

2.2. Влияние удлинения материалов лайнера

Удлинение материала лайнера проявляется при растяжении в процессе формирования пенетратора. На рис. 3 приведены расчетные параметры пенетраторов (v , L/d) в зависимости от удлинения материалов δ , %. Отношение L/d увеличивается линейно с ростом удлинения, аппроксимирующие кривые имеют вид:

ударное ядро:

$$L/d = -0.97 + 0.06\delta,$$

удлиненный ударник:

$$L/d = -1.14 + 0.14\delta.$$

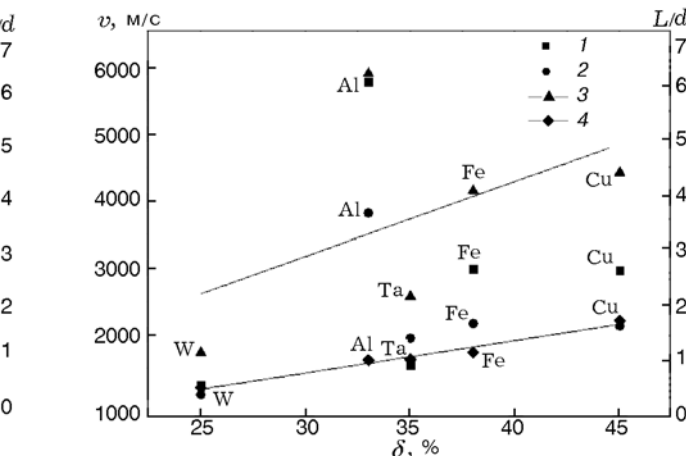


Рис. 3. Влияние удлинения материалов на параметры формируемых пенетраторов в момент времени $t = 160$ мкс:

1 — скорость головной части удлиненных ударников, 2 — скорость головной части ударных ядер, 3 — отношение длины к диаметру удлиненных ударников, 4 — отношение длины к диаметру ударных ядер

При образовании удлиненного ударника из алюминиевого лайнера отношение L/d описывается линейной зависимостью (2): из-за низких плотности и прочности алюминия скорость головной части пенетратора высока и он растягивается за очень короткое время, образуя длинную струю, которая частично испаряется в процессе растяжения. Хотя отношение L/d у пенетратора из алюминия большое, этот материал не подходит для формирования удлиненного ударника.

3. ФОРМИРОВАНИЕ ПЕНЕТРАТОРОВ ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ МАССЫ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Влияние материала лайнера на формирование пенетраторов исследовалось при одной той же структуре заряда. В этом случае объем лайнера оставался постоянным, а масса менялась с изменением плотности материалов лайнера, что в результате приводило к существенному изменению параметров сформированных пенетраторов. В дальнейшем влияние материала лайнера исследовалось при изменении его толщины так, чтобы масса оставалась постоянной и равной массе лайнера из меди. В результате получены толщины лайнеров из алюминия, железа, тантала и вольфрама, равные 12.25, 4.33, 2.05 и 1.935 мм соответственно.

Таблица 2

Формы пенетраторов при одной и той же массе лайнера в момент времени $t = 160$ мкс

Материал	Форма ударного ядра	Форма удлиненного ударника
Алюминий		
Чистое железо		
Красная медь		
Тантал		
Вольфрам		

Результаты моделирования показаны в табл. 2. Лайнеры из всех материалов формируют типичные ударные ядра, но только чистое железо и медь дают ударное ядро желаемой формы.

3.1. Влияние плотности материала

Расчетные скорости головной части и длины пенетраторов в зависимости от плотности материалов лайнера представлены на рис. 4. Выбор длины вместо отношения L/d обусловлен тем, что при использовании тантала и вольфрама хвостовая часть пенетраторов разрушается. В соответствии с законом сохранения энергии скорость пенетратора остается постоянной при одной и той же массе и лайнера, и заряда. Поэтому скорость ударных ядер практически не меняется с ростом плотности материалов, в то время как скорость удлиненных ударников падает. Это обусловлено тем, что градиент скорости между головной и хвостовой частями удлиненного ударника больше,

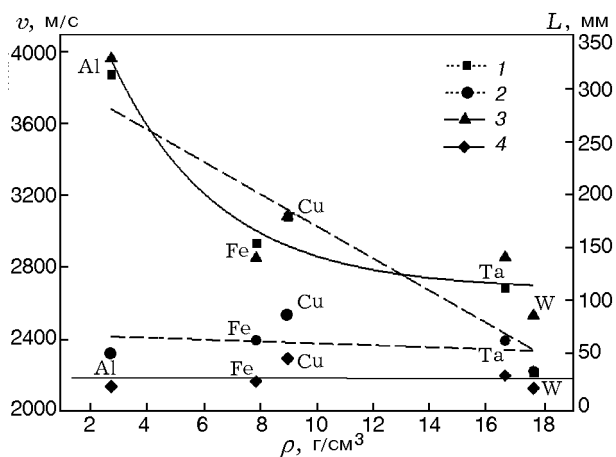


Рис. 4. Зависимости скорости и длины головной части пенетраторов от плотности материалов лайнера в момент времени $t = 160$ мкс:

1 — длина удлиненных ударников, 2 — длина ударных ядер, 3 — скорость головной части удлиненных ударников, 4 — скорость головной части ударных ядер

чем у ударного ядра, поэтому penetrator легко разрушается, что приводит к потере его массы. У различных материалов потеря массы разная, поэтому значения скорости противоречивы. В то же время изменение длины ударника в зависимости от плотности согласуется с данными на рис. 2.

3.2. Влияние удлинения материала

Удлинение материала влияет на растяжение в ходе формирования penetrator. Результаты моделирования показывают, что длина и скорость penetrator увеличиваются линейно с ростом удлинения (рис. 5). Эта зависимость не реализуется для алюминия (см. рис. 3). По форме penetrator, сформированного из алюминия (см. табл. 2), видно, что небольшая часть его разрушается и испаряется, тогда как длина оставшейся части соответствует кривой на рис. 5. Улучшенное удлинение материала гарантирует хорошее растяжение penetrator и высокую скорость его головной части. Поэтому для лайнера следует выбирать материал с лучшим удлинением и средней плотностью. Сравнение форм и параметров penetrator показывает, что наилучшими материалами являются чистое железо и медь. Однако в реальности использование стали, которая богата углеродом, вместо чистого железа может сильно повлиять на процесс формирования penetrator.

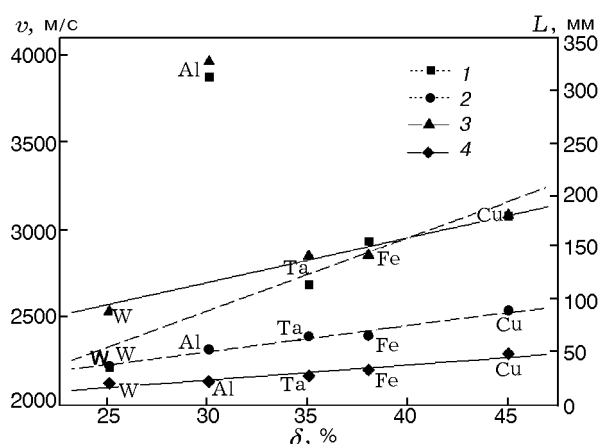


Рис. 5. Зависимости скорости и длины головной части penetrator от удлинения материалов в момент времени $t = 160$ мкс:

1 — длина удлинённых ударников, 2 — длина ударных ядер, 3 — скорость головной части удлинённых ударников, 4 — скорость головной части ударных ядер

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проверки результатов моделирования проведены эксперименты с лайнерами из меди, стали 20 и алюминия в той же постановке, что и при моделировании. Ударное ядро формируется при центральном инициировании в точке O , а удлинённый ударник — при кольцевом инициировании на радиусе A (см. рис. 1). Для рентгенографирования использовали две импульсные установки фирмы Hewlett-Packard Co. с напряжением 450 кВ, синхронизация которых обеспечивала получение снимков penetrator в нужный момент времени для определения их форм и скоростей различных частей.

Рентгеновские изображения и расчетные формы penetrator из меди, стали 20 и алюминия в момент времени 120 мкс приведены на рис. 6. Эксперимент со сталью 20, характеризующейся высоким содержанием углерода, сопоставлен с результатом расчета для чистого железа. Видно, что в обоих случаях формируется полусферическое ударное ядро. Поскольку в эксперименте использовался алюминиевый сплав, характеристики которого отличаются от чистого алюминия, то наблюдается некото-



Рис. 6. Сопоставление форм penetrator, формирующихся при центральном и кольцевом инициировании взрыва: расчет и экспериментальные рентгеновские снимки

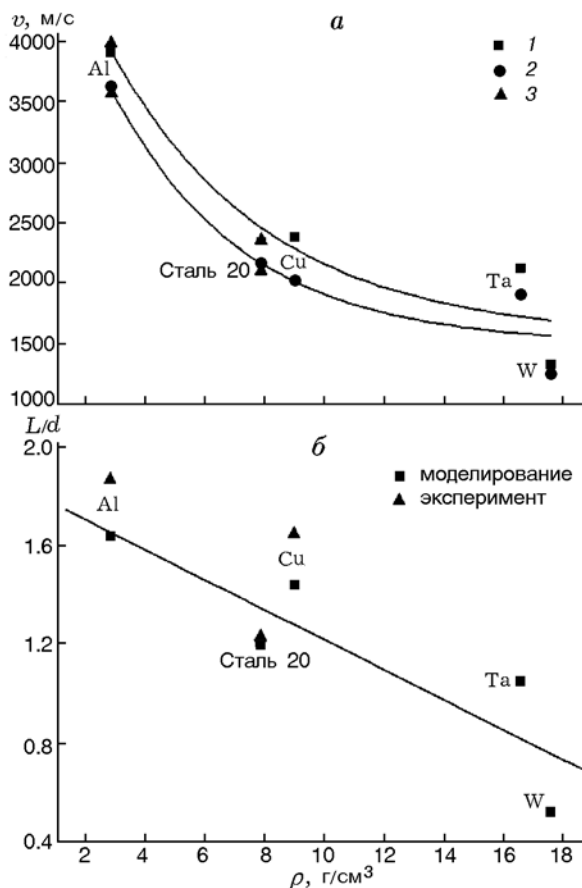


Рис. 7. Зависимости параметров формируемых ударных ядер от плотности материалов лайнера в момент времени $t = 120$ мкс:

a — расчет скорости: 1 — головной части, 2 — хвостовой части, 3 — эксперимент; b — отношение длины к максимальному диаметру

рое различие экспериментальной и расчетной форм пенетраторов. У алюминиевого удлиненного ударника происходит разрушение головной части и испарение разрушенных частей, что связано с низкой температурой плавления. При росте плотности материалов от 2.77 до 8.96 г/см³ скорость головной части удлиненных ударников уменьшилась на 41.5 % — с 5.19 до 3.04 км/с, а отношение L/d уменьшилось на 30.4 % — с 5.2 до 3.62.

Экспериментальные и соответствующие им расчетные параметры формируемых ударных ядер из меди, алюминия и стали в зависимости от плотности материалов представлены на рис. 7. Чтобы зависимости были более явными, на рисунке добавлены расчетные результаты для тантала и вольфрама. Расчетные значения L/d идут ниже эксперименталь-

ных (рис. 7, б), что вызвано тем, что разрушение хвостовой части пенетратора делает ее диаметр меньше, чем при моделировании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из исследованных материалов (алюминий, чистое железо, медь, тантал и вольфрам) медь и чистое железо являются лучшими материалами для лайнеров при формировании ударных ядер и удлиненных ударников.

2. С ростом плотности от 2.77 до 17.6 г/см³ скорость ударного ядра, сформированного при инициировании заряда в центре, уменьшается на 66.3 %, а скорость головной части удлиненного ударника, сформированного при многоточечном кольцевом инициировании, уменьшается на 74.8 %.

3. Сопоставление характеристик пяти использованных материалов при расчетах с одним и тем же объемом лайнера или одной и той же массой показало, что наиболее подходящими для лайнеров являются материалы с хорошим динамическим удлинением и средней плотностью.

4. В экспериментах с лайнерами из меди, стали 20 и алюминиевого сплава установлено, что высокое содержание углерода в стали 20 по сравнению с чистым железом сильно влияет на формирование пенетратора, а низкая точка плавления алюминия приводит к раннему разрушению пенетратора и его частичному испарению. Поэтому эти два материала не подходят для использования в кумулятивных зарядах.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (грант № 11202103) и исследовательского фонда Нанжинского научно-технологического университета (NUST) (№ 2013ZJ_0201).

ЛИТЕРАТУРА

1. Whelan A. J. Multiple effects warheads for defeat of urban structures and armour // Proc. of the 24th Intern. Symp. on Ballistics. — 2008. — P. 1092–1098.
2. Bat G., Peters D., Maré J., et al. Multi-purpose projectile concept to balance the conflicting requirements for peace support operations // Ibid. — P. 1085–1091.
3. Steinmann F., Lösch C. Multimode warhead technology studies // Proc. of the 21th Intern. Symp. on Ballistics. — 2004. — P. 728–735.
4. Baker E. L., Daniels A. S., Turci J. P., et al. Selectable initiation shaped charges // Proc. of

- the 20th Intern. Symp. on Ballistics. — 2002. — P. 589–596.
5. **Bender D., Fong R., Ng W., et al.** Dual mode warhead technology for future smart munitions // Proc. of the 19th Intern. Symp. on Ballistics. — 2001. — P. 679–684.
 6. **Fong R.** Warhead Technology Advancements. National Defense Industrial Association, 2000. — (ADA394848).
 7. **Fong R.** Explosively formed penetrator (EFP) warhead concept // 41st Annu. Bomb & Warhead Techn. Meeting. — 1991. — V. 1. — P. 172–197.
 8. **Li W. B., Wang X. M., Li W. B.** The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator // Intern. J. Impact Eng. — 2010. — V. 37, N 4. — P. 414–424.
 9. **Li W. B., Wang X. M., Li W. B., et al.** Effect of liner configuration parameter on formation of multimode penetrator // J. Ballistics. — 2009. — V. 21, N 1. — P. 19–23.
 10. **Miller S., Kliminz G.** The role of rayleigh taylor instability in shaped charge jets formation and stability // Proc. of the 22nd Intern. Symp. on Ballistics. — 2005. — P. 468–475.
 11. **Ouye N., Boeka D., Hancock S.** Material strength effects on shaped charge tip velocities // Proc. of the 23th Intern. Symp. on Ballistics. — 2007. — P. 215–222.
 12. **Fong R., Ng W., Tang S., et al.** Application of powder tantalum material for explosively formed penetrator // Proc. of the 22nd Intern. Symp. on Ballistics. — 2005. — P. 677–681.
 13. **Kecskes L., Walters W.** Investigation of a bulk metallic glass as a shaped charge liner material // Proc. of the 23th Intern. Symp. on Ballistics. — 2007. — P. 31–38.
 14. **Cowan K., Bourne B.** Oxide glasses as shaped charge liners // Proc. of the 21th Intern. Symp. on Ballistics. — 2004. — P. 517–524.
 15. **Rolc S., Buchar J., Akstein Z.** Computer simulation of explosively formed projectiles (EFP) // Proc. of the 23th Intern. Symp. on Ballistics. — 2007. — P. 185–192.
 16. **Fong R., Kraft J.** Advances in non-tantalum EFP warhead designs // Proc. of the 21th Intern. Symp. on Ballistics. — 2004. — P. 721–727.
 17. **Cowan K., Curtis J., Bourne B.** Further analytical modelling of the shaped charge jet incoherency phenomenon // Proc. of the 20th Intern. Symp. on Ballistics. — 2002. — P. 517–524.
 18. **Bourne B., Cowan K., Curtis J.** Shaped charge warheads containing low melt energy metal liners // Proc. of the 19th Intern. Symp. on Ballistics. — 2001. — P. 583–590.
 19. **Meister J., Haller F.** Experimental and numerical studies of annular projectile charges // Ibid. — P. 575–581.
 20. **Manfred H.** Liners for shaped charges // J. Battlefield Technol. — 2001. — V. 4, N 3. — P. 2–11.
 21. **Alistar D.** Some metallurgical aspects of shaped charge liners // J. Battlefield Technol. — 1998. — V. 1, N 3. — P. 1–9.
 22. **McWilliams S. T., Baker E. L., Ng K. W., et al.** High spin armor piercing warheads development with Mo and Ta liners // Intern. Infantry & Small Arms. — 2002.
 23. **Winer K. A., Breithaupt R. D., Muelder S. A., et al.** High-resolution observations of Tungsten liner collapse and early Jet formation // Proc. of the 16th Intern. Symp. on Ballistics. — 1996. — P. 449–458.
 24. **Huang B., Li C., Shi L., et al.** China Materials Engineering Canon. — Beijing: Chemistry Industry Press, 2005. — V. 2. — P. 85–99; V. 4. — P. 49–52, 217–237; V. 5. — P. 1–66, 187–199.
 25. **Johnson G. R., Cook W. H.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of the 7th Intern. Symp. on Ballistics. — 1983. — P. 541–547.
 26. **Johnson G. R.** Dynamic analysis of explosive-metal interaction in three dimensions // Appl. Mech. — 1981. — V. 103. — P. 30–34.
 27. **Johnson G. R., Stryk R. A.** Some considerations for 3D EFP computations // Intern. Impact Eng. — 2006. — V. 32, N 10. — P. 1621–1634.
 28. **Livermore.** LS-DYNA Keyword User's Manual. — Livermore Software Technology Corporation, California, 2003.
 29. **Lin J. J.** Research on the formability of EFP and its terminal effect: PhD diss. of Univ. of Science and Technology of China. — 2009. — P. 51–53.

*Поступила в редакцию 17/І 2014 г.,
в окончательном варианте — 21/Х 2014 г.*