

УДК 623.4.082.6; 538.951
EDN: QDSNUU

PACS: 47.40.Rs

Усовершенствованные кумулятивные облицовки типа полусфера-цилиндр для взрывного формирования компактных медных элементов в широком диапазоне скоростей

© С. В. Федоров*, И. А. Болотина, Ю. А. Струков, П. В. Мерзлякова

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, 105005 Россия

*E-mail: sergfed-64@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.07.2026; после доработки 01.09.2026; принята к публикации 22.10.2026

Шифр научной специальности 1.3.17.

Для исследований поведения материалов и объектов при высокоскоростном ударном воздействии предлагается использовать кумулятивные заряды с усовершенствованными комбинированными облицовками типа полусфера-цилиндр. По данным проведенного численного моделирования показано, что замена в таких облицовках, изготовленных из меди, полусферической части с постоянной толщиной на слегка вытянутую вдоль оси симметрии полуэллипсоидную с толщиной, снижающейся от ее вершины к основанию, позволяет получать компактные элементы, движущиеся со скоростями до 9,5 км/с.

Ключевые слова: взрыв, кумулятивный заряд (КЗ), высокоскоростной компактный элемент, комбинированная облицовка полусфера-цилиндр, численное моделирование.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-7-14

Введение

Исследования поведения материалов в экстремальных условиях сверхвысоких скоростей деформирования, давлений и температур, реализующихся при высокоскоростном соударении тел (со скоростями на уровне нескольких километров в секунду и выше) представляют большой интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения [1]. Для проведения экспериментов по высокоинтенсивному ударному воздействию на исследуемые объекты и материалы необходимы устройства, разгоняющие тела (ударники) определенной массы до сверхвысоких скоростей. Среди прочих методов получения высокоскоростных элементов простотой реализации отличаются взрывные методы, основанные на использовании энергии взрыва химических взрывчатых веществ (ВВ) [2, 3].

Взрывные метательные устройства

Конструктивные схемы взрывных метательных устройств весьма разнообразны. В системах многокаскадного взрывного ускорения металлических пластин достигаются скорости метания пластин миллиметровой толщины свыше 10 км/с [4]. Широко при взрывном получении высокоскоростных ударников используются взрывные кумулятивные устройства различного типа (рис. 1), в которых создаются условия для локализации определенной части энергии взрыва в ограниченной пространственной области [2, 5]. К их числу относится газокумулятивный заряд [3, 6, 7], представляющий собой трубчатый заряд ВВ, в канале которого на его оси размещается ускоряемое тело (рис. 1а). Такие заряды по данным [3, 6] позволяли разгонять стальные и стеклянные шарики миллиметро-

вых размеров массой 0,01–0,03 г до скоростей 10–14 км/с. При этом в случае разгона элементов граммовой массы до скорости 8 км/с требуемые массы заряда ВВ достигают 100 кг, что создает проблемы при использовании таких устройств. В кумулятивных зарядах (КЗ) с цилиндрической металлической облицовкой (рис. 1б) при ее схлопывании под действием сходящейся детонационной волны образуется осевой поток микроскопических металлических частиц со скоростями в десятки километров в секунду [2, 8]. Наибольшая скорость частиц была достигнута при использовании бериллиевых трубок, она достигала

90 км/с. Во взрывных устройствах, схемы которых приведены на рис. 1в, з, формирование высокоскоростного элемента происходит в результате схлопывания выемки в металлическом образце при распространении по нему ударной волны [5, 9]. Согласно экспериментальным данным [5, 9] при использовании подобных взрывных устройств удавалось получать компактные стальные элементы массой до 0,25 г со скоростью до 8 км/с, титановые элементы массой около 0,1 г со скоростью 9 км/с и алюминиевые элементы с той же, что у титановых, массой со скоростью до 11,3 км/с.

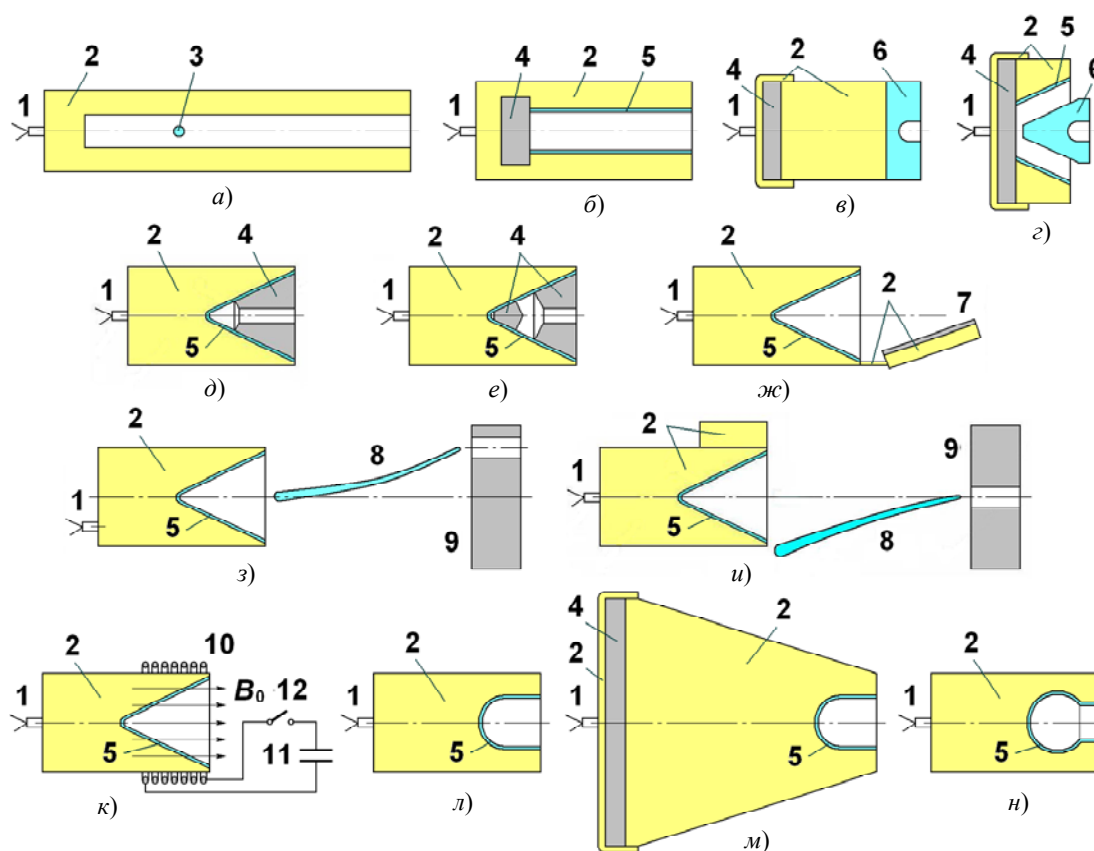


Рис. 1. Взрывные метательные устройства: а) – газокумулятивный заряд; б) – КЗ с цилиндрической облицовкой; в), з) – устройства с ударно-волновым нагружением металлического образца с выемкой; д)–к) – КЗ с конической облицовкой с различными вариантами «отсечки» компактного элемента; л)–н) – КЗ с комбинированными облицовками (1 – детонатор; 2 – взрывчатое вещество; 3 – ускоряемое тело; 4 – инертный вкладыши; 5 – кумулятивная облицовка; 6 – металлический образец с выемкой; 7 – пластина, метаемая на кумулятивную струю; 8 – искривленная кумулятивная струя; 9 – преграда для «отсечки» хвостовой части кумулятивной струи; 10 – соленоид; 11 – конденсаторная батарея; 12 – коммутатор)

Довольно большое число схем взрывного получения высокоскоростных компактных элементов связано с использованием КЗ с металлическими коническими облицовками (рис. 1д–к) [2, 10]. В обычных условиях при схлопывании таких облицовок формируются

высокоградиентные (растягивающиеся в свободном полете) кумулятивные струи со скоростью «головы» до 10 км/с [2, 11]. Для отделения от металлической кумулятивной струи ее головного участка и получения, таким образом, высокоскоростного компактного элемен-

та рассматривается применение различных способов. Следует отметить, что представленные на рис. 1д–к схемы «отсечки» для КЗ с коническими облицовками пока рассматривались лишь в теоретическом плане. В отличие от них обширные экспериментальные данные по формированию компактных элементов имеются в отношении КЗ с облицовкой комбинированной формы полусфера-цилиндр (ПЦ-облицовкой) (рис. 1л) [5, 12]. Большой вклад в исследования КЗ с ПЦ-облицовками внес сотрудник московского НИИ-6 (в настоящее время ФГУП «ЦНИИХМ им. Д. И. Менделеева») П. И. Потапов, проводивший их с середины 50-х годов прошлого века. В КЗ с ПЦ-облицовками образование высокоскоростного компактного элемента происходит в результате «отсечки» схлопывающейся цилиндрической частью облицовки головного участка струйного течения, формирующегося при обжати полусферической части облицовки. Авторами [12] путем пропорционального изменения размеров была отработана линейка КЗ с ПЦ-облицовкой, формирующих компактные стальные элементы массой от 17 до 100 г при их скоростях на уровне 6 км/с. Для увеличения скорости компактных элементов, формируемых ПЦ-облицовками, в [5] было предложено нагружать ПЦ-облицовку маховой детонационной волной за счет использования системы кольцевого инициирования заряда ВВ, что привело к существенному увеличению размеров заряда (рис. 1м). В результате удалось повысить скорость формируемого ПЦ-облицовкой стального элемента до 8 км/с при его массе 12 г. Возможные направления совершенствования ПЦ-облицовок были предложены по результатам численного моделирования в [13], где было показано, что на повышение массово-скоростных характеристик формируемых элементов можно рассчитывать при выполнении струеобразующей части комбинированной облицовки в форме усеченной сферы (сферического сегмента с высотой, большей его радиуса) с дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщиной для усиления проявления эффекта сферической кумуляции в процессе взрывного обжатия (рис. 1н) [14]. Возможность увеличения скорости компактных элементов за счет придания полусферической части ПЦ-обли-

цовки дегрессивной толщины подтверждена экспериментально в [15], где с использованием подобных ПЦ-облицовок были получены стальные элементы со скоростями до 8,6 км/с. Платой за увеличение скорости явилось существенное снижение массы элементов (более, чем в 10 раз).

Проведенный анализ взрывных металлических устройств (рис. 1) позволяет выделить в качестве наиболее перспективного для практического применения по таким показателям, как масса и скорость получаемых компактных элементов, простота конструкции и масса используемого ВВ, КЗ с ПЦ-облицовкой (рис. 1л) при ее дополнительной модификации, в том числе, согласно предложениям [13]. Помимо придания струеобразующей части дегрессивной толщины еще одним достаточно просто реализуемым усовершенствованием ПЦ-облицовки является переход от полусферической формы струеобразующей части к форме полуэллипсоида, слегка вытянутого вдоль оси симметрии. В соответствии с данными [13, 16, 17] это позволяет увеличить массивность головного участка струйного течения, формирующегося при обжати струеобразующей части. Целью проведенного исследования являлось определение на основании численного моделирования диапазона скоростей и масс компактных элементов, которые можно получить с использованием КЗ с усовершенствованными комбинированными облицовками.

Постановка численного моделирования

Численное моделирование проводилось в рамках двумерной осесимметричной задачи механики сплошных сред с использованием компьютерной программы моделирования взрывных и ударных процессов ЭРУДИТ, разработанной в МГТУ им. Н. Э. Баумана и реализующей вычислительный алгоритм свободных лагранжевых точек [13, 14, 17, 18]. В расчетах рассматривался цилиндрический КЗ диаметром $d_0 = 100$ мм и длиной $h_0 = 150$ мм, инициируемый в точке на оси симметрии торца, противоположного кумулятивной выемке. Характеристики используемого ВВ соответствовали высокобризантному составу на осно-

ве октогена [2]: плотность – 1,74 г/см³; скорость детонации – 8600 м/с; в качестве материала комбинированной облицовки была выбрана медь.

Рассматривавшиеся медные комбинированные облицовки (рис. 2) имели струеобразующую часть, наружная поверхность которой была полуэллипсоидальной с экваториальным радиусом R_s и полярным радиусом R_z или полусферической при $R_z = R_s$. Толщина струеобразующей части составляла δ_s в ее основании (месте ее сопряжения с цилиндрической частью) и δ_z в ее вершине. В цилиндрической системе координат (r, z) с началом в основании струеобразующей части ее наружная поверхность описывается уравнением

$$\frac{r^2}{R_s^2} + \frac{z^2}{R_z^2} = 1.$$

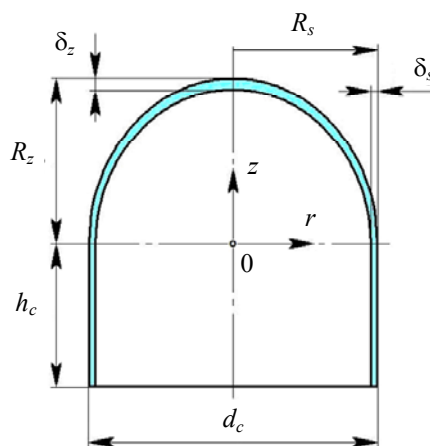


Рис. 2. Модифицированная комбинированная облицовка

Уравнение внутренней поверхности струеобразующей части имело вид

так что при показателе степени $n = 2$ внутренняя поверхность была полуэллипсоидальной, а при значениях n , отличных от 2, она имела форму полусуперэллипсоида [17]. Цилиндрическая часть комбинированной облицовки имела наружный диаметр $d_c = 2R_s$, длину h_c и толщину δ_s , совпадающую с толщиной основания струеобразующей части.

Первоначально было промоделировано формирование компактного элемента из типовой ПЦ-облицовки, геометрические размеры которой в соотношении с диаметром КЗ были такими же, как у ПЦ-облицовок, использовавшихся в экспериментах [5, 12]. Струеобразующая часть этой ПЦ-облицовки имела форму полусферы с наружным радиусом $R_s = R_z = 29,4$ мм и постоянной толщиной $\delta_s = \delta_z = 2,6$ мм, длина цилиндрической части составляла $h_c = 26$ мм, полная масса облицовки M_l была равна 224 г. На рис. 3 полями плотностей материалов и распределениями осевой скорости v_z на оси симметрии проиллюстрировано формирование компактного элемента из типовой ПЦ-облицовки (координата z отсчитывается от основания КЗ с облицовкой; время отсчитывается от момента инициирования КЗ). Скорость формируемого элемента составила $v_e \approx 6,17$ км/с при его массе $m_e \approx 28,5$ г (примерно 12,5 % от массы всей облицовки). По массе, форме и скорости компактного элемента, формируемого КЗ с типовой ПЦ-облицовкой, результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными [12].

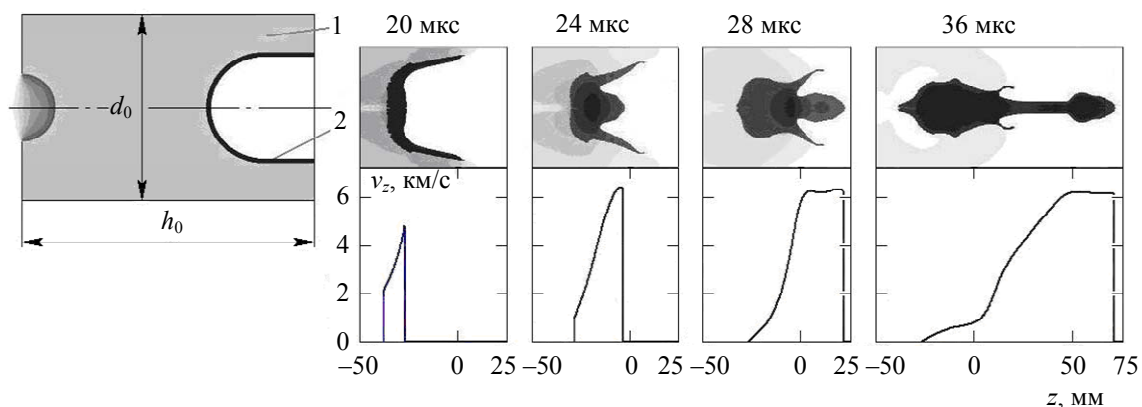


Рис. 3. Формирование высокоскоростного компактного элемента КЗ с типовой ПЦ-облицовкой (1 – заряд ВВ; 2 – ПЦ-облицовка)

Получение компактных медных элементов со скоростями от 5 до 9,5 км/с

Путем численных расчетов подбирались геометрические параметры комбинированной облицовки (рис. 2), позволяющие сформировать компактный элемент с заданным уровнем скорости при максимально возможном значении его массы. Расчеты показали, что для реализации своевременной «отсечки» компактных элементов с более высокой скоростью требуется уменьшение радиуса цилиндрической части облицовки и, соответственно, совпадающего с ним экваториального радиуса струеобразующей части R_s . В результате были определены параметры комбинированных облицовок для формирования компактных элементов со скоростями в диапазоне 5–9,5 км/с (таблица, рис. 4). Диаметр их цилиндрической части d_c (рис. 2) уменьшался от $0,8d_0$ до $0,4d_0$.

Как видно из рис. 4, во всех случаях распределение осевой скорости по длине формирующегося элемента близко к постоянному значению. При этом получаемые элементы имеют удлинение (отношение длины элемента

к диаметру его миделя) в диапазоне примерно 1,5–2,5. При скоростях элементов v_e менее 8,5 км/с удается подобрать параметры комбинированной облицовки такими, чтобы масса элемента m_e была на уровне 16–18 % от массы облицовки M_l (см. таблицу), что заметно превышает показатель относительной массы элемента для типовой ПЦ-облицовки (составлявший около 12,5 %). При значениях $v_e > 8,5$ км/с соотношение масс получаемого элемента и облицовки m_e/M_l снижается, составляя при $v_e = 9,43$ км/с около 11 %. Вплоть до скорости 8 км/с кинетическая энергия W_e формируемых компактных элементов сохраняется на одном уровне, примерно на 35 % превышающем кинетическую энергию элемента со скоростью чуть выше 6 км/с, получаемого с использованием «стандартной» ПЦ-облицовки (для «стандартной» ПЦ-облицовки $W_e \approx 540$ кДж). При увеличении скорости формируемых модифицированными ПЦ-облицовками компактных элементов свыше 8 км/с снижение их массы становится более резким, и кинетическая энергия элементов W_e уменьшается (см. таблицу).

Таблица

Параметры комбинированных облицовок и формируемых при их взрывном обжатии компактных элементов

№	Параметры комбинированной облицовки								Параметры комп. элемента			
	d_c/d_0	R_s , мм	R_z , мм	n	δ_z , мм	δ_s , мм	h_c , мм	M_l , г	v_e , км/с	m_e , г	m_e/M_l	W_e , кДж
1	0,8	40	40	1,85	2,8	1,8	30	339	4,93	58,0	0,171	705
2	0,8	40	40	1,9	2,8	1,8	33	333	4,93	62,0	0,186	753
3	0,78	39	39		2,8	1,8	32	315	5,28	54,0	0,171	753
4	0,74	37	37		2,4	1,8	30	271	5,7	45,0	0,166	731
5	0,7	35	35		2,4	2,0	30	276	5,8	40,0	0,145	673
6	0,72	36	36		2,4	1,8	30	258	6,05	42,0	0,163	769
7	0,7	35	35		2,4	1,8	30	246	6,38	37,0	0,150	753
8	0,68	34	34		2,4	1,8	30	233	6,62	32,0	0,137	701
9	0,64	32	37	2	2,4	1,8	25	190	6,87	28,5	0,150	673
10	0,64	32	38		2,4	1,6	26	187	6,94	31,0	0,166	747
11	0,64	32	38		2,2	1,4	26	166	7,13	29,5	0,178	750
12	0,6	30	34		2,4	1,8	24	167	7,2	24,0	0,144	622
13	0,6	30	36		2,4	1,4	25	151	7,65	23,0	0,152	673
14	0,6	30	36		2,2	1,2	27	137	7,87	23,5	0,172	728
15	0,6	30	36		2,4	1,2	28	142	8,1	22,0	0,155	722
16	0,5	25	30		2,0	1,0	21	79	8,45	14,0	0,177	500
17	0,5	25	29		2,4	1,0	24	86	8,95	12,5	0,145	501
18	0,5	25	29		2,6	1,0	27	93	9,25	12,0	0,129	513
19	0,4	20	23		2,6	1,0	23	61	9,43	6,5	0,107	289

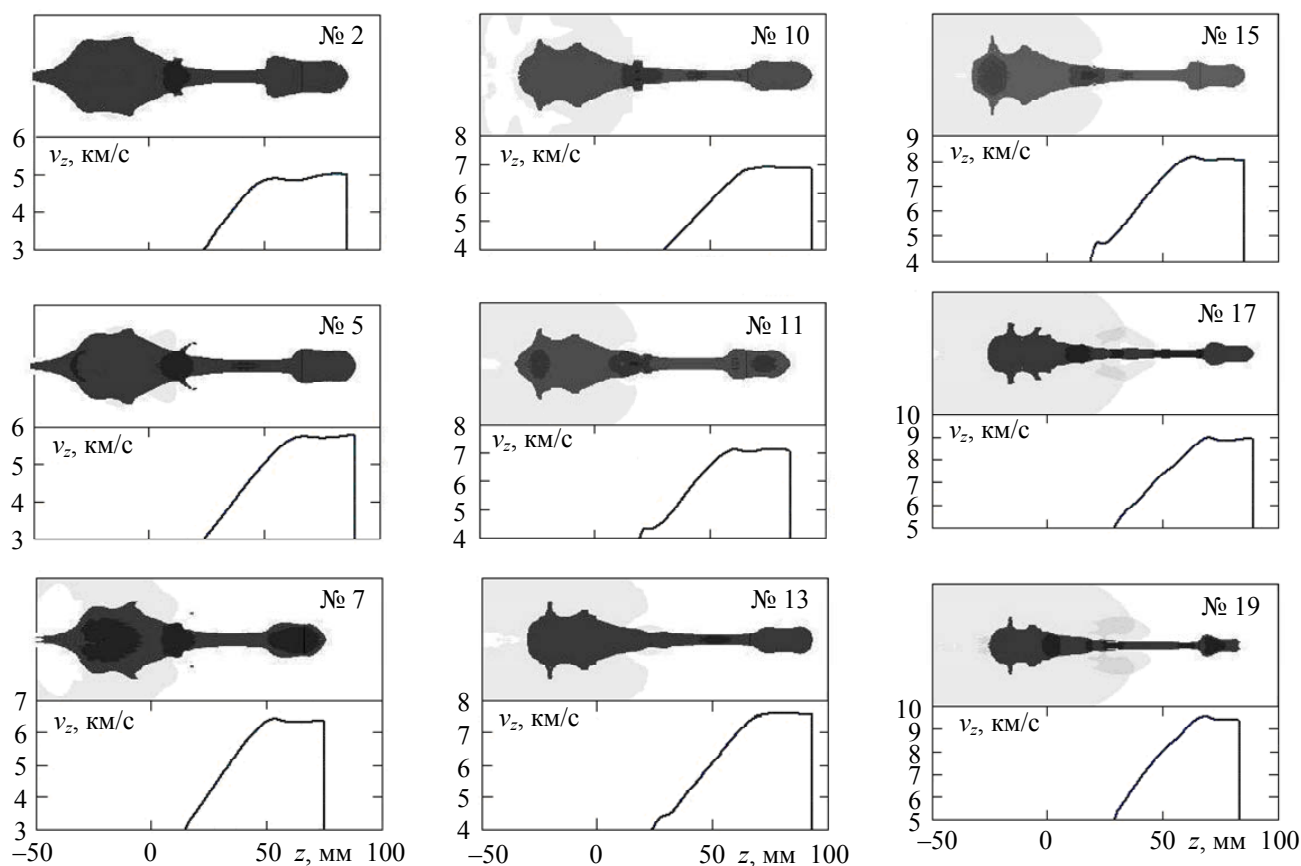


Рис. 4. Формирование компактных элементов со скоростями в диапазоне 5–9,5 км/с с использованием усовершенствованных комбинированных облицовок (для каждого варианта указан его номер в таблице)

Закключение

Проведенное на основании численного моделирования исследование позволяет указать возможные направления совершенствования геометрии комбинированных облицовок для существенного повышения скорости формируемых компактных элементов по сравнению с уровнем, обеспечиваемым применяемыми в настоящее время ПЦ-облицовками со струеобразующей частью в форме полусферы постоянной толщины. Переход к модифицированным ПЦ-облицовкам со струеобразующей частью дегрессивной толщины, наружная поверхность которой является полусферической или полуэллипсоидальной, а внутренняя – полуэллипсоидальной или полусуперэллипсоидальной, обеспечил возможность получения медных компактных элементов со скоростями в диапазоне 5–9,5 км/с. При принятом диаметре $K3 d_0 = 100$ мм масса получаемых с использованием модифицированных ПЦ-облицовок компактных элементов со скоростью 9 км/с может быть на уровне 10 г.

Статья посвящается памяти сотрудника РФЯЦ-ВНИИЭФ Виктора Александровича Могилева, внесшего большой вклад в исследования взрывных методов ускорения тел до высоких скоростей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. High-velocity impact phenomena / Ed. Kinslow R. – New York and London, Academic Press, 1970.
2. Физика взрыва. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. Орленко Л. П. – М.: Физматлит, 2004.
3. Мерзиевский Л. А., Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Швецов Г. А. / Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 5. С. 77–91.
4. Batkov Yu. V., Kovalev N. P., Kovtun A. D., Kurapatkin V. G., Lebedev A. I., Makarov Yu. M., Manachkin S. F., Novikov S. A., Raevsky V. A. / International Journal of Impact Engineering. 1997. Vol. 20. № 1-5. P. 89–92.
5. Герасимов С. И., Маляров Д. В., Сироткина А. Г., Капинос С. А., Калмыков А. П., Князев А. С. / Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 4. С. 128–136.
6. Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Титова Н. С. / Доклады Академии наук СССР. 1968. Т. 180. № 5. С. 1051–1052.

7. Belov G. V., Dyakin E. P., Demidov A. A., Zimalin V. S., Meltsas V. Yu., Polevoi O. N., Smirnov G. S., Chikin Yu. N., Chizhov V. I., Shustova N. I., Yamolkin E. L. / International Journal of Impact Engineering. 2003. Vol. 29. № 1-10. P. 105–116.
8. Koski W. S., Lucy F. A., Shreffler R. G., Willig F. J. / Journal of Applied Physics. 1952. Vol. 23. № 12. P. 1300–1305.
9. Selivanov V. V., Gryaznov E. F., Goldenko N. A., Sudomoev A. D., Feldstein V. A. / Acta Astronautica. 2017. Vol. 135. P. 56–62.
10. Katayama M., Kibe S. / International Journal of Impact Engineering. 2001. Vol. 26. № 1-10. P. 357–368.
11. Walters W. P., Zukas J. A. Fundamentals of Shaped Charges. – New York, Wiley, 1989.
12. Жданов И. В., Князев А. С., Маляров Д. В. / Тр. Томского гос. ун-та. Сер. физ.-мат. 2010. Т. 276. С. 193–195.
13. Федоров С. В., Баянова Я. М., Ладов С. В. / Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 1. С. 150–164.
14. Федоров С. В. / Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2017. № 3. С. 71–92. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-3-71-92>.
15. Федоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М., Баскаков В. Д., Бабурин М. А., Курепин А. Е., Горбунков А. А., Пирозерский А. С. / Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 4. С. 122–125.
16. Selivanov V. V., Ladov S. V., Silnikov M. V., Nikol'skaya Ya. M. / Acta Astronautica. 2021. Vol. 180. P. 149–154.
17. Fedorov S. V., Kolpakov V. I., Vinogradova E. P., Bolotina I. A. / Acta Astronautica. 2022. Vol. 190. P. 231–240.
18. Федоров С. В., Бабкин А. В., Велданов В. А., Гладков Н. А., Ладов С. В. / Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2016. № 5. С. 18–32. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2016-5-18-32>.

PACS: 47.40.Rs

Improved shaped-charge liners of the hemisphere-cylinder type for explosive forming compact copper elements over a wide range of velocities

S. V. Fedorov*, I. A. Bolotina, Yu. A. Strukov, and P. V. Merzlyakova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia

*E-mail: sergded-64@mail.ru

Received 13.07.2026; revised 01.09.2026; accepted 22.10.2026

To study the behavior of materials and objects under high-velocity impact, it is proposed to use shaped charges with improved combined hemisphere-cylinder liners. According to numerical modeling data, it is shown that replacing a hemispherical part with a constant thickness in such copper liners with a semi-ellipsoid one slightly elongated along the symmetry axis with a thickness decreasing from its tip to the base makes it possible to obtain compact elements moving at velocities up to 9.5 km/s.

Keywords: explosion, shaped charge, high-velocity compact element, combined hemisphere-cylinder liner, numerical modeling.

REFERENCES

1. High-velocity impact phenomena / Ed. Kinslow R. New York and London, Academic Press, 1970.
2. Physics of Explosion. In 2 vols. Vol. 2. / Ed. Orlenko L. P. Moscow, Fizmatlit, 2004 [in Russian].
3. Merzhievskii L. A., Titov V. M., Fadeenko Yu. I., and Shvetsov G. A., Combustion, Explosion, and Shock Waves **23** (5), 576–589 (1987).
4. Batkov Yu. V., Kovalev N. P., Kovtun A. D., Kuropatkin V. G., Lebedev A. I., Makarov Yu. M., Manachkin S. F., Novikov S. A., and Raevsky V. A., International Journal of Impact Engineering **20** (1-5), 89–92 (1997).
5. Gerasimov S. I., Malyarov D. V., Sirotkina A. G., Kapinos S. A., Kalmykov A. P., and Knyazev A. S., Combustion, Explosion, and Shock Waves **56** (4), 486–493 (2020).
6. Titov V. M., Fadeenko Yu. I., and Titova N. S., Dokl. Akad. Nauk SSSR **180** (5), 1051–1052 (1968).
7. Belov G. V., Dyakin E. P., Demidov A. A., Zimalin V. S., Meltsas V. Yu., Polevoi O. N., Smirnov G. S., Chikin Yu. N., Chizhov V. I., Shustova N. I., and Yamolkin E. L., International Journal of Impact Engineering **29** (1-10), 105–116 (2003).

8. Koski W. S., Lucy F. A., Shreffler R. G., and Willig F. J., *Journal of Applied Physics* **23** (12), 1300–1305 (1952).
9. Selivanov V. V., Gryaznov E. F., Goldenko N. A., Sudomoev A. D., and Feldstein V. A., *Acta Astronautica* **135**, 56–62 (2017).
10. Katayama M. and Kibe S., *International Journal of Impact Engineering* **26** (1-10), 357–368 (2001).
11. Walters W. P. and Zukas J. A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, Wiley, 1989.
12. Zhdanov I. V., Knyazev A. S., and Malyarov D. V., *Tr. Tomsk. Gos. Univ., Ser. Fiz.-Mat.* **276**, 193–195 (2010) [in Russian].
13. Fedorov S. V., Bayanova Ya. M., and Ladov S. V., *Combustion, Explosion, and Shock Waves* **51** (1), 130–142 (2015).
14. Fedorov S. V. *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Natural Sciences*, № 3, 71–92 (2017). <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-3-71-92>.
15. Fedorov S. V., Ladov S. V., Nikolskaya Ya. M., Baskakov V. D., Baburin M. A., Kurepin A. E., Gorbunkov A. A., and Pirozerskii A. S., *Combustion, Explosion, and Shock Waves* **53** (4), 479–482 (2017).
16. Selivanov V. V., Ladov S. V., Silnikov M. V., and Nikol'skaya Ya. M., *Acta Astronautica* **180**, 149–154 (2021).
17. Fedorov S. V., Kolpakov V. I., Vinogradova E. P., and Bolotina I. A., *Acta Astronautica* **190**, 231–240 (2022).
18. Fedorov S. V., Babkin A. V., Veldanov V. A., Gladkov N. A., and Ladov S. V., *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Natural Sciences*, № 5, 18–32 (2016). <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2016-5-18-32>.

Об авторах

Федоров Сергей Владимирович, старший преподаватель кафедры СМ-4 «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, Россия). E-mail: sergfed-64@mail.ru SPIN-код: 8488-0728, AuthorID: 126035

Болотина Ирина Алексеевна, старший преподаватель кафедры СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, Россия). E-mail: b.mount@mail.ru SPIN-код: 3333-3294, AuthorID: 860494

Струков Юрий Алексеевич, к.т.н., доцент кафедры ФН-4 «Физика» МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, Россия). E-mail: ustrukov@rambler.ru SPIN-код: 4592-3598, AuthorID: 681082

Мерзлякова Полина Владимировна, лаборант, студентка 5-го курса кафедры СМ-4 «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н. Э. Баумана (105005, Москва, Россия). E-mail: merzlaykova@list.ru ORCID: 0009-0009-3080-9197