

УДК 623.4.082.6

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ КУМУЛЯТИВНЫМИ ЗАРЯДАМИ С ОБЛИЦОВКОЙ ТИПА ПОЛУСФЕРА — ЦИЛИНДР ДЕГРЕССИВНОЙ ТОЛЩИНЫ

С. В. Фёдоров<sup>1</sup>, С. В. Ладов<sup>1</sup>, Я. М. Никольская<sup>1</sup>, В. Д. Баскаков<sup>1</sup>,  
М. А. Бабурин<sup>1</sup>, А. Е. Курепин<sup>2</sup>, А. А. Горбунков<sup>3</sup>, А. С. Пирозерский<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва  
sergfed-64@mail.ru

<sup>2</sup>ГосНИИмаш им. В. В. Бахирева, 606002 Дзержинск

<sup>3</sup>НИИ «Геодезия», 141292 Красноармейск

<sup>4</sup>НПО «Базальт», 105058 Москва

Осуществлено рентгенографирование потоков частиц, образуемых кумулятивными зарядами со стальной облицовкой комбинированной формы полусфера — цилиндр с полусферической частью дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию) толщины. Экспериментально установлено, что переход от постоянной к дегрессивной толщине полусферической части позволяет увеличить скорость головного участка формируемого при ее обжати струйного течения материала облицовки, который отсекается впоследствии при схлопывании цилиндрической части. Максимальная скорость частиц, полученных в опытах в результате «отсечки», составила 8.6 км/с.

Ключевые слова: взрывное метание, кумулятивный заряд, комбинированная облицовка полусфера — цилиндр, дегрессивная толщина, высокоскоростной элемент.

DOI 10.15372/FGV20170412

При исследовании поведения материалов и конструкций в условиях метеоритного воздействия одним из наиболее эффективных методов получения высокоскоростных компактных элементов [1–3] по комплексу критериев, включающему в себя массово-скоростные параметры получаемых элементов, габариты метательных устройств, стоимость и трудоемкость проведения экспериментов, является применение кумулятивных зарядов с облицовкой комбинированной формы полусфера — цилиндр (ПЦ-облицовкой). Благодаря простоте и небольшим размерам метательного устройства данный способ формирования высокоскоростных элементов получил достаточно широкое распространение на практике. Большой вклад в исследование кумулятивных зарядов с ПЦ-облицовкой внес сотрудник одного из московских научно-

исследовательских институтов П. И. Потапов, в связи с чем их часто называют зарядом Потапова. Согласно данным [2, 4] применение ПЦ-облицовок позволило отработать систему геометрически подобных кумулятивных зарядов, устойчиво формирующих компактные стальные элементы массой  $17 \div 100$  г, движущиеся со скоростью около 6 км/с.

Задачи моделирования метеоритного удара требуют получения компактных элементов с более высокими скоростями (10 км/с и выше). В работе [5] на основе численных расчетов предложены пути повышения скорости компактных элементов, формируемых при взрывном обжати ПЦ-облицовок. Основная идея заключается в переходе от постоянной толщины полусферической части используемых в настоящее время ПЦ-облицовок к дегрессивной (уменьшающейся от вершины к основанию полусферы). Как было показано в [5, 6], при взрывном обжати полусферических облицовок дегрессивной толщины увеличивается скорость формирующегося струйного течения, что связано с созданием условий для более близкого к сферически-симметричному обжати облицовки и с усилением в связи с этим эффек-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания по разделу «Инициативные научные проекты» (код проекта 9.5330.2017 БЧ).

© Фёдоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М.,  
Баскаков В. Д., Бабурин М. А., Курепин А. Е.,  
Горбунков А. А., Пирозерский А. С., 2017.

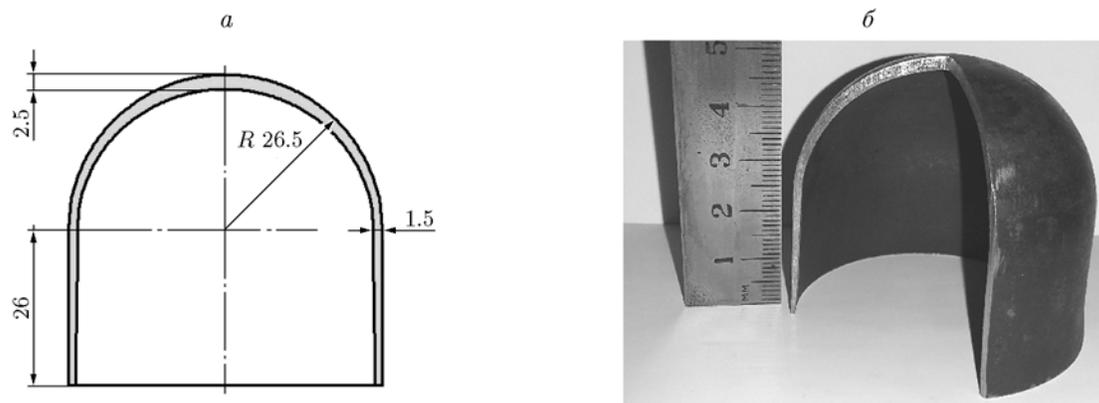


Рис. 1. Стальная ПЦ-облицовка дегрессивной толщины, использовавшаяся в экспериментах

та сферической кумуляции (концентрации кинетической энергии во внутренних слоях схлопывающейся сферической оболочки). В кумулятивных зарядах с ПЦ-облицовками образование высокоскоростных компактных элементов происходит в результате «отсечки» головной части струйного течения, формирующегося из полусферической части облицовки, при схлопывании ее цилиндрической части. Переход к ПЦ-облицовке с полусферической частью дегрессивной толщины позволяет получить для последующей «отсечки» головной участок струйного течения с более высокой скоростью [5].

Для экспериментальной проверки полученного при численном моделировании [5, 6] увеличения скорости струйных течений, формируемых при взрывном обжати полусферических облицовок дегрессивной толщины, были изготовлены стальные ПЦ-облицовки (рис. 1) с таким же радиусом полусферической части и той же высотой цилиндрической части, что и у стальной ПЦ-облицовки одного из кумулятивных зарядов, использовавшихся в экспериментах [2, 4]. Взятая в качестве базовой ПЦ-облицовка имела полусферическую часть постоянной толщины 2.5 мм. В отличие от нее, у изготовленных ПЦ-облицовок толщина полусферической части уменьшалась от 2.5 мм в вершине до 1.5 мм в основании (месте сопряжения полусферической части с цилиндрической).

Для изготовления ПЦ-облицовок с полусферической частью дегрессивной толщины использовалась технология штамповки пластичным металлом (свинцом) из листовой заготовки в форме диска переменной толщины [7, 8]. Радиус диска выбирался из условия равенства

его площади и площади боковой поверхности ПЦ-облицовки. Толщина диска уменьшалась вдоль его радиуса по линейному закону от центра к краю, что обеспечивало дегрессивность толщины получаемой ПЦ-облицовки. В качестве материала ПЦ-облицовок использовалась сталь 1Х18Н9Т. После штамповки ПЦ-облицовку отжигали и подрезали ее торец, никакой другой механической обработки не проводилось. Отсутствие токарной обработки наружной и внутренней поверхностей ухудшало точность изготовления ПЦ-облицовок (разброс по толщинам в вершине и у основания полусферической части достигал 0.1 мм), однако при этом существенно снижались трудоемкость и стоимость изготовления ПЦ-облицовок. При принятой технологии изготовления небольшой дегрессивностью толщины обладала и цилиндрическая часть ПЦ-облицовки (см. рис. 1).

Кумулятивные заряды, снаряженные с использованием изготовленных ПЦ-облицовок, имели цилиндрическую форму и соответствовали цилиндрическому заряду диаметром 90 мм, комплектуемому базовой ПЦ-облицовкой с полусферической частью постоянной толщины [2, 4]. Близкими в обоих случаях были и детонационные характеристики взрывчатых составов. Как и в экспериментах с указанным зарядом [2, 4], инициирование подготовленных зарядов с ПЦ-облицовкой дегрессивной толщины было одноточечным в центре торца, противоположного кумулятивной выемке.

Как показали рентгенографические исследования, при взрывном обжати ПЦ-облицовок дегрессивной толщины формируется поток высокоскоростных частиц, постепенно рассеивающихся в радиальном направлении, с лидирую-

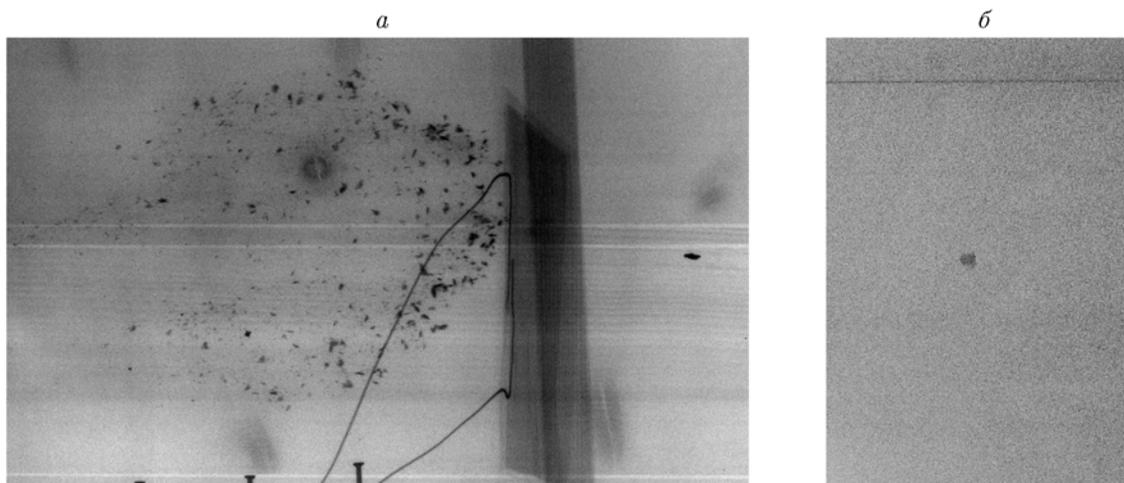


Рис. 2. Рентгенограммы высокоскоростных частиц, образованных при взрывном обжати деградированной толщины ПЦ-облицовок

щей частицей, движущейся вдоль оси кумулятивного заряда (рис. 2). Рентгенографирование осуществлялось на основе метода цифровой радиографии с использованием люминесцентных запоминающих пластин [9]. Их разрешающая способность составляла  $0.2 \div 0.5$  мм при времени экспозиции (длительности импульса рентгеновского излучения) 20 нс и экспозиционной дозе  $3 \div 20$  мР. Рентгеновская съемка проводилась в двух взаимно перпендикулярных плоскостях с некоторым разнесением во времени, что позволяло определять по снимкам скорость частиц в различных частях потока. Для фиксации скорости лидирующей частицы дополнительно использовались фольговые электроконтактные датчики. Погрешность определения скорости не превышала 0.3 км/с.

Рентгенограмма на рис. 2,а соответствует моменту времени, когда лидирующая частица находится на расстоянии около 0.7 м от основания заряда с кумулятивной выемкой. В данном опыте ее скорость составляла 7.8 км/с, размеры — длина около 8 мм, диаметр в среднем сечении примерно 3 мм. Видно, что на некотором удалении от лидирующей частицы движется рассеивающееся облако частиц (приближающееся в зафиксированный момент времени к электроконтактному датчику, находящемуся в поле съемки). Скорость частиц на передней границе облака около 7.1 км/с. Очевидно, зафиксированная на рис. 2,а картина полностью согласуется с принципом «работы» ПЦ-облицовки. Лидирующая частица представляет собой отсеченный головной участок струйного

течения, сформированного при обжати полусферической части ПЦ-облицовки, а движущаяся вслед за ней облако частиц — результат разрушения материала при схлопывании отсекающей цилиндрической части.

В опыте, которому соответствует рентгенограмма на рис. 2,б, была сформирована лидирующая частица со скоростью 8.6 км/с, длиной около 6 мм и диаметром примерно 4.5 мм с утолщением в передней части до 6 мм. Ее съемка осуществлена на расстоянии около 2 м от основания кумулятивного заряда. К этому моменту времени произошло значительное рассеивание следующего за ней потока частиц (на удалении до 0.5 м позади лидирующей частицы на регистрирующих пластинах шириной 350 мм не наблюдалось следов каких-либо других частиц). На рентгенограмме еще одного опыта в головной части потока вместо одной лидирующей частицы зафиксировано скопление нескольких частиц неправильной формы, движущихся примерно с одинаковыми скоростями  $\approx 8.1$  км/с.

В экспериментах [2, 4] кумулятивным зарядом с базовой ПЦ-облицовкой (с полусферической частью постоянной толщины) формировался компактный элемент со скоростью 6 км/с и массой  $\approx 17$  г. Как следует из результатов проведенных опытов, переход к ПЦ-облицовке деградированной толщины позволил в соответствии с полученными ранее данными численных расчетов [5, 6] заметно повысить скорость отсекаемого головного участка струйного течения, формируемого при обжа-

тии полусферической части (приращение скорости  $30 \div 43$  %, разброс связан, очевидно, с геометрическими погрешностями изготовления ПЩ-облицовок, обусловленными упрощенностью использованной технологии). Зафиксированное в опытах существенное уменьшение размеров лидирующей частицы по сравнению с размерами компактного элемента, формируемого базовой ПЩ-облицовкой, также предсказывалось численным моделированием. В работе [5] было показано, что увеличение «массивности» головного участка струйного течения с возросшей скоростью, обеспечиваемой деградацией толщины струеобразующей части комбинированной облицовки, может быть достигнуто, если этой части придать форму усеченной сферы или слегка вытянутого эллипсоида вращения. Экспериментальная проверка данных усовершенствований является предметом дальнейших исследований. Значение же проведенных экспериментов заключается в том, что они подтвердили высказанную в [5, 6] основную идею увеличения скорости струйных течений при взрывном обжатии облицовок полусферической или близкой к ней формы, состоящую в переходе от постоянной к деградационной толщине облицовки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мерзиевский Л. А., Титов В. М., Фаденко Ю. И., Швецов Г. А. Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 77–91.
2. Балеевский А. Г., Киселев Ю. Г., Могилев В. А. и др. Высокоскоростное метание компактных элементов // Сб. докл. науч. конф. Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». — Саратов: ВНИИЭФ, 2000. — С. 244–248.
3. Фёдоров С. В. О возможности «отсечки» лидирующего высокоскоростного участка металлической струи при взрыве кумулятивного заряда в аксиальном магнитном поле // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. — 2008. — № 2. — С. 73–80.
4. Жданов И. В., Князев А. С., Маляров Д. В. Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств // Тр. Том. гос. ун-та. Сер. физ.-мат. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2010. — Т. 276. — С. 193–195.
5. Фёдоров С. В., Баянова Я. М., Ладов С. В. Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых взрывом компактных элементов // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 1. — С. 150–164.
6. Фёдоров С. В. Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками деградационной толщины // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 116–130.
7. Бабуринов М. А., Баскаков В. Д., Зарубина О. В. и др. Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампуемых свинцом оболочковых деталей // Технология металлов. — 2016. — № 11. — С. 2–8.
8. Бабуринов М. А., Баскаков В. Д., Тарасов В. А., Зарубина О. В. Оценка предельной степени вытяжки цилиндрических деталей из переменных по толщине дисковых заготовок // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. — 2015. — № 1. — С. 3–6.
9. Пирозерский А. С., Лукашев К. А. Методика определения глубины пробития броневых преград по данным рентгеноимпульсной съемки кумулятивных струй // Сб. тр. Седьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — С. 472.

*Поступила в редакцию 29/XI 2016 г.*