

О влиянии технологии изготовления кумулятивной облицовки на характеристики высокоскоростного элемента

© В.И. Колпаков, Н.А. Кудюков

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

Рассмотрены результаты математического моделирования функционирования кумулятивных зарядов, кумулятивные облицовки (КО) которых состоят из разных материалов. Эти заряды образуют в результате функционирования высокоскоростные элементы. Как правило, КО для таких зарядов изготавливают методом холодной штамповки. Альтернативным методом получения облицовок является ротационная вытяжка. При этом можно ожидать, что прочностные характеристики раскатанной облицовки будут выше по сравнению с характеристиками штампованной облицовки из того же материала и с теми же геометрическими параметрами. Для выявления закономерностей формирования высокоскоростных элементов из штампованных и раскатанных КО численно с использованием аппарата механики сплошных сред моделировалось действие кумулятивных зарядов, в составе которых имелись стальные или медные сегментные облицовки малого прогиба. Влияние способа изготовления КО учитывалось путем варьирования значений физико-механических характеристик материала облицовки. Конструктивные параметры моделируемого заряда (за исключением величины прогиба КО) на протяжении расчетного исследования оставались неизменными и соответствовали параметрам применяемых в настоящее время образцов. По результатам численных экспериментов показано, что высокоскоростные элементы, образованные из раскатанных облицовок, менее склонны к разрушению при формировании и обладают большей наполненностью материалом, чем элементы, образованные из штампованных КО.

Ключевые слова: *снарядоформирующий заряд, высокоскоростной элемент, кумулятивная облицовка, технология изготовления, штамповка, ротационная вытяжка, численное моделирование*

Введение. Одними из основных средств, традиционно применяющихся для пробития прочных преград, являются кумулятивные заряды [1]. В ракетной технике особое место среди них занимают снарядоформирующие заряды (СФЗ), состоящие из металлической кумулятивной облицовки (КО) малого прогиба, корпуса, детонатора и взрывчатого вещества (рис. 1, 2). В результате функционирования СФЗ происходят обжатие и деформирование КО с последующим образованием из такой облицовки — в зависимости от конструктивных параметров заряда — компактного или удлиненного высокоскоростного элемента (ВЭ) [1–4].

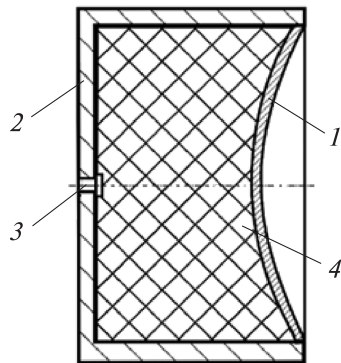


Рис. 1. Типовая схема снарядоформирующего заряда:

1 — облицовка; 2 — корпус; 3 — детонатор;
4 — заряд взрывчатого вещества

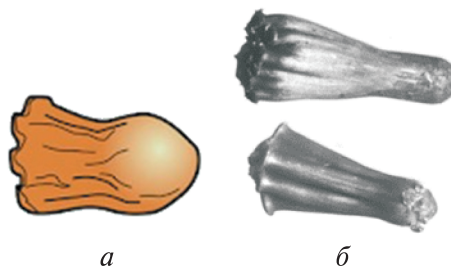


Рис. 2. Компактный (а) и удлиненные (б) высокоскоростные элементы

Для обеспечения заданных показателей функционирования СФЗ необходимо образование ВЭ требуемой формы (удлинения), не разрушающихся при формировании и сохраняющих свою целостность во время движения по траектории. Соответствие данному требованию особенно актуально для СФЗ, применяемых в составе управляемых снарядов, самоприцеливающихся боевых элементов, специальных частей ракетных изделий, где перед облицовкой заряда располагается аппаратура управления и наведения, обладающая собственными прочностью и сжимаемостью.

Описание проблемы. Основным способом формирования ВЭ является использование в СФЗ конических или сегментных облицовок малого прогиба, которые ограничены сферическими поверхностями с радиусами кривизны, существенно превышающими диаметр заряда. Масса элементов, образованных такими СФЗ, может составлять до 90 % массы облицовки, а скорость достигать 2,5 км/с. При этом кинетическая энергия подобных ВЭ сопоставима с кинетической энергией артиллерийских бронебойных снарядов.

В зависимости от требуемых параметров действия по преграде необходимо создание компактных или удлиненных ВЭ, не разрушающихся при формировании и сохраняющих свою целостность на траектории. Компактные ВЭ характеризуются удлинением (отношением длины к диаметру) $\bar{l} \approx 1$. Такие элементы применимы для дейст-

вия по преградам, расположенным на небольшом удалении от заряда. С увеличением расстояния между СФЗ и преградой, которое может достигать 1000 калибров, целесообразно применение удлиненных ВЭ ($\bar{l} \geq 3...4$), имеющих достаточный запас аэродинамической устойчивости [1, 3, 4].

Механизм формирования и параметры высокоскоростных элементов зависят от множества параметров заряда: типа взрывчатого вещества (ВВ), конструктивных параметров, способа инициирования и т.д. Значительное влияние на параметры элемента оказывают также конструктивные и физико-механические характеристики КО [1, 3, 4].

В настоящее время в качестве материалов КО используется большая группа металлов, среди которых наибольшее распространение получили мягкая сталь, медь, тантал, никель и их сплавы с вольфрамом [1]. На практике чаще используются СФЗ со стальными КО (11ЮА, 08кп, 11кп), реже — с медными.

Как правило, облицовки для СФЗ изготавливают методом холодной штамповки. Дополнительно возможно применение механической обработки для обеспечения требуемых качества поверхности облицовки и переменной толщины вдоль ее образующей. Однако при механической обработке может возникать (наряду с другими) проблема закрепления заготовки в трехкулачковом патроне ввиду малости ширины закрепления (1...4 мм) [5].

Одним из альтернативных методов изготовления облицовок для СФЗ является ротационная вытяжка. Этот способ позволяет изготавливать облицовки сложного осесимметричного профиля, в том числе переменной толщины, и обеспечивать требуемое качество поверхности КО без дополнительной механической обработки. При этом можно ожидать, что раскатанная облицовка будет иметь более высокие прочностные характеристики, чем штампованная облицовка из того же материала, имеющая те же геометрические параметры.

Цель настоящей работы — исследование закономерностей формирования ВЭ кумулятивными зарядами с облицовками из различных материалов, изготовленные разными способами.

Постановка задачи. Для достижения поставленной цели численно с использованием аппарата механики сплошных сред в двумерной осесимметричной постановке [6] решались задачи формирования ВЭ кумулятивными зарядами, имеющими в составе медные (М2) или стальные (11ЮА) сегментные КО, изготовленные штамповкой или ротационной вытяжкой. Конструктивные параметры моделируемого заряда, за исключением величины прогиба облицовки, соответствовали актуальным и применяемым на сегодняшний день образцам и на протяжении всех расчетных исследований оставались неизменными (рис. 3):

| | |
|---------------------------------------------------|-----------------------|
| Диаметр корпуса d , мм | 68,5 |
| Диаметр заряда d_3 , мм | 62,5 |
| Высота заряда h_3 , мм | 50 |
| Диаметр КО d_0 , мм | 62,5 |
| Радиус КО R_0 , мм | 40...54 |
| Высота КО (прогиб) h_0 , мм (h_0/d_0) | 10...15 (0,16...0,24) |
| Толщина КО δ_0 , мм | 2,5 |

Для выявления закономерностей образования ВЭ моделировалось функционирование нескольких образцов в невозмущенной воздушной среде, различающихся материалом, физико-механическими параметрами и величиной прогиба облицовки.

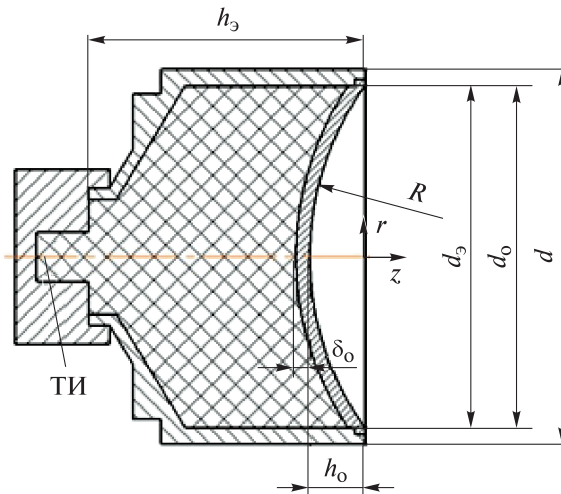


Рис. 3. Расчетная схема снарядоформирующего заряда

Для материалов элементов конструкции (стального корпуса, металлической КО) принималась модель идеальной упруго-пластической среды с разрушением. Для описания разрушения материала облицовки использовался критерий Смирнова — Аляева в виде $\varepsilon_i \geq \varepsilon_p^*$, где ε_i — интенсивность деформаций; ε_p^* — предельная пластическая деформация, $\varepsilon_p^* = A_\varepsilon \ln \frac{1}{1-\psi}$ ($A_\varepsilon = 2$ — коэффициент, ψ — относительное сужение материала) [3, 7, 8].

В качестве уравнений состояния (УРС) взаимодействующих сред использовались следующие соотношения [9]:

для материалов корпуса и облицовки — баротропная зависимость вида

$$p = K \left(\frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right),$$

где p — давление; K — модуль объемного сжатия; ρ , ρ_0 — текущая и начальная плотность материала соответственно;

для воздуха — УРС идеального газа

$$p = (k - 1) \rho e,$$

где k — показатель адиабаты; e — внутренняя энергия;

для продуктов детонации — УРС в форме JWL

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v} \right) \exp(r_1 v) + B \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v} \right) \exp(r_2 v) + \frac{\omega}{v} e_0,$$

где A , B , r_1 , r_2 , v , ω — константы, для моделируемого ВВ константы рассчитывались по методике [10].

Характеристики используемых материалов КО представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материалов элементов конструкции корпус — кумулятивная облицовка

| Материал | Начальная плотность материала ρ_0 , г/см ³ | Модуль объемного сжатия K , ГПа | Динамический предел текучести Y , ГПа | Предельная пластическая деформация ε_p^* |
|------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Сталь 11ЮА | 7,85 | 175 | 0,5–1,0 | 2,5 |
| Медь М2 | 8,90 | 152,8 | 0,4–0,8 | 2,8 |

Корпус СФЗ выполнен из стали ($\rho_0 = 7,85$ г/см³; $K = 175$ ГПа; $Y = 0,5$ ГПа).

Характеристики ВВ и окружающей среды приведены ниже:

ТГ-40

Начальная плотность ρ_0 , г/см³ 1,68

Скорость детонации D , км/с 7,85

Удельная теплота взрыва Q , МДж/кг 7,74

Воздух

Начальная плотность ρ_0 , г/см³ $1,225 \cdot 10^{-3}$

Атмосферное давление p_0 , ГПа $1,013 \cdot 10^{-4}$

При выполнении расчетов особенности влияния технологии изготовления КО на ее физико-механические характеристики учитывались путем варьирования значения динамического предела текучести

материала. Из эксперимента известно, что статический предел текучести раскатанной облицовки оказывается примерно в 2 раза выше, чем штампованной. В настоящей работе принимались допущения, что динамический предел текучести КО в зависимости от способа ее изготовления изменялся аналогичным образом, а также, что физико-механические характеристики облицовки постоянны вдоль ее образующей (изотропия свойств материала облицовки).

Результаты расчетов. На основе разработанных математической модели и расчетных схем проведено моделирование действия группы различных зарядов. По результатам моделирования были определены параметры образованных ВЭ (табл. 2). Исследовались значения наполненности ВЭ (отношения толщины головной части элемента h_3 к его длине l_3), удлинения \bar{l} и скорости v_3 . На рис. 4, 5 представлена динамика формирования ВЭ некоторыми из рассмотренных зарядов.

Таблица 2

Характеристики высокоскоростных элементов, образованных в результате моделирования действия снарядоформирующих зарядов

| Обозначение СФЗ | Прогиб КО h_0/d_0 | Диаметр d_3 , мм | Наполненность h_3/d_3 | Удлинение, $\bar{l} = l_3/d_3$ | Скорость v_3 , км/с |
|-----------------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Стальная штампованная КО, $Y = 0,5$ ГПа | | | | | |
| С-16 | 0,16 | 19 | 0,26 | 2,57 | 2,02 |
| С-19 | 0,19 | 17 | 0,50 | 2,59 | 1,84 |
| С-21 | 0,21 | 12 | Частичное разрушение элемента | | |
| Стальная раскатанная КО, $Y = 1,0$ ГПа | | | | | |
| С-16Р | 0,16 | 27 | 0,20 | 1,11 | 2,01 |
| С-19Р | 0,19 | 22 | 0,32 | 1,27 | 1,81 |
| С-21Р | 0,21 | 21 | 0,42 | 1,57 | 1,89 |
| С-24Р | 0,24 | 20 | 0,69 | 1,70 | 1,82 |
| Медная штампованная КО, $Y = 0,4$ ГПа | | | | | |
| М-16 | 0,16 | 14 | 0,25 | 3,71 | 1,87 |
| М-19 | 0,19 | 12 | 0,87 | 5,00 | 1,81 |
| М-21 | 0,21 | 10 | Разрушение и разрыв элемента | | |
| Медная раскатанная КО, $Y = 0,8$ ГПа | | | | | |
| М-16Р | 0,16 | 22 | 0,24 | 1,50 | 1,94 |
| М-19Р | 0,19 | 20 | 0,39 | 1,90 | 1,80 |
| М-21Р | 0,21 | 17 | 0,60 | 2,65 | 1,75 |
| М-24Р | 0,24 | 13 | 0,82 | 3,67 | 1,66 |

Параметры СФЗ С-16 полностью соответствуют существующему и применяемому на сегодня «штатному» образцу (рис. 4, а). Геомет-

рические параметры сформированного в ходе расчета ВЭ с достаточной точностью согласуются с параметрами элементов, образующихся при функционировании реальных образцов (рис. 5, а, д). При увеличении прогиба стальной штампованной КО до значений, превышающих 0,2, внутренняя область ВЭ разрушается на стадии формирования вследствие интенсивных пластических деформаций, а сам элемент стремится к разрыву (рис. 4, б).

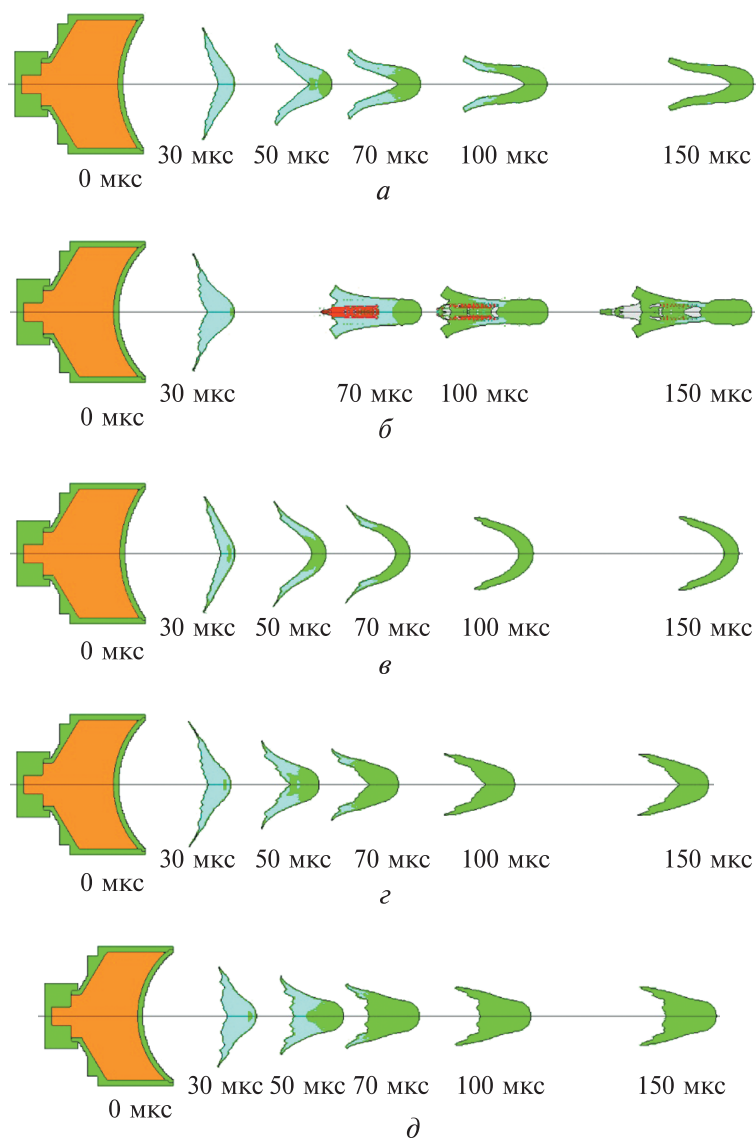


Рис. 4. Динамика формирования ВЭ зарядами со стальными КО (поле состояний материала):

а — СФЗ С-16; б — СФЗ С-21; в — СФЗ С-16Р; г — СФЗ С-21Р; д — СФЗ С-24Р

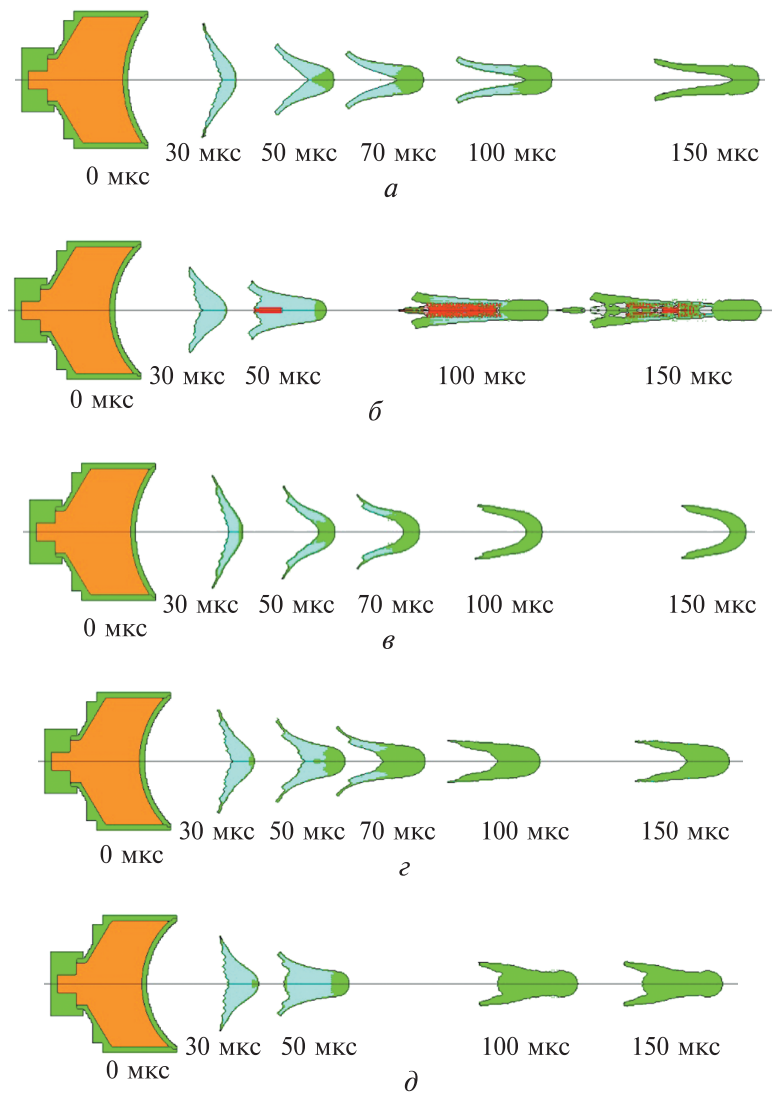


Рис. 5. Динамика формирования ВЭ зарядами с медными КО (поле состояний материала):

a — СФЗ М-16; *б* — СФЗ М-21; *в* — СФЗ М-16Р; *з* — СФЗ М-21Р; *д* — СФЗ М-24Р

Применение в «штатном» заряде С-16 стальной раскатанной облицовки с увеличенным пределом динамической текучести приводит к образованию компактного ВЭ большого диаметра, но с головной частью малой толщины (рис. 4, *в*). С практической точки зрения такой ВЭ не находит применения и не представляет интереса. При увеличении прогиба стальной раскатанной КО до значений 0,2...0,24 (заряды С-21Р, С-24Р) образованные компактные ВЭ не претерпевают разрушения на этапе формирования и обладают существенно большей наполненностью по сравнению со «штатным» ВЭ (рис. 4, *з*, *д*).

Применение медной штампованной КО в СФЗ «штатной» конструкции (С-16) приводит к образованию удлиненного ВЭ, однако его скорость, наполненность и диаметр малы (см. рис. 5, а). Разрушение внутренней части элементов на стадии формирования начинается уже с величины прогиба облицовки 0,19, а при дальнейшем его увеличении ВЭ практически полностью разрушается и разрывается на отдельные элементы (рис. 5, б).

Применение раскатанных медных КО позволяет получать относительно компактные ВЭ при значениях прогиба КО порядка 0,19. При увеличении прогиба до значений 0,21...0,24 возможно образование целостных, практически полностью сплошных удлиненных ВЭ (рис. 5, з, д).

Следует отметить, что форма ВЭ, образованного зарядом М-24Р, имеет сходство с формой медного ВЭ, полученного в результате экспериментальной обработки [11] (рис. 6, з, е).

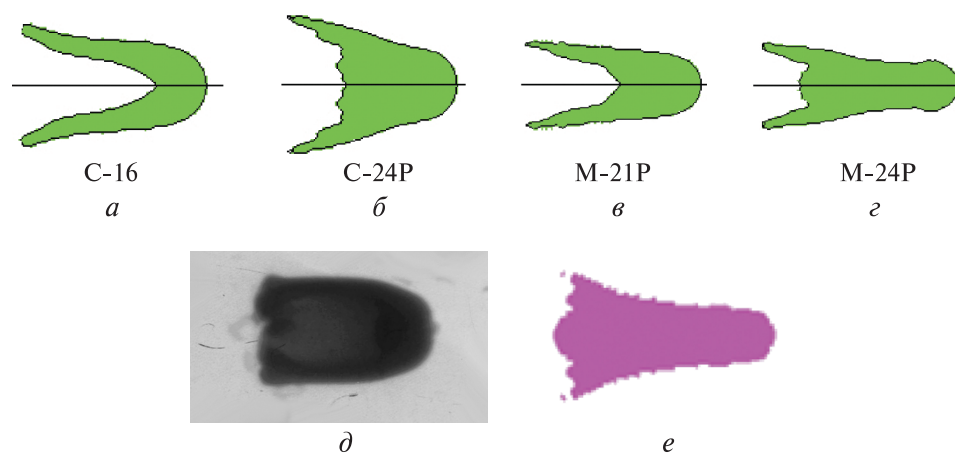


Рис. 6. Профили высокоскоростных элементов:

а-г — профили ВЭ, полученные в результате моделирования; д — ВЭ, образованный «штатным» опытным образцом; е — ВЭ, созданный опытным СФЗ с медной КО

Несмотря на то что конструктивные параметры СФЗ, описанного в [11], несколько отличаются от тех, что у рассмотренного в настоящей работе, полученное сходство параметров ВЭ позволяет допускать возможность применения использованного подхода для оценки влияния технологии изготовления КО на параметры высокоскоростных элементов.

Результаты моделирования показали, что скорость медных ВЭ, образованных из раскатанных КО с прогибом больше 0,2, на 7...10 % ниже, чем у «штатного» стального (см. табл. 2). В то же время ввиду их большей наполненности и прочности можно ожидать значения параметров действия по преграде на уровне не ниже, чем у «штатного». Данный вопрос требуется рассмотреть отдельно.

Сравнивая динамику формирования ВЭ из КО, изготовленных различными технологическими способами, необходимо отметить, что ВЭ из раскатанных облицовок формируются за меньшее время, чем из штампованных (под формированием подразумевается отсутствие пластических деформаций в ВЭ после действия взрывного нагружения — монохромное изображение элемента на рис. 4, 5). С учетом повышенной прочности раскатанной КО представляет интерес изучение закономерностей формирования ВЭ снарядоформирующими зарядами в составе конкретных управляемых изделий с учетом влияния бортовой аппаратуры.

Заключение. Обобщая результаты проведенных исследований, необходимо отметить, что высокоскоростные элементы, образованные из раскатанных облицовок, в значительно меньшей степени склонны к разрушению на стадии формирования. При этом возможно образование удлиненных ВЭ из раскатанных медных облицовок при увеличении их прогиба и сохранении неизменными остальных конструктивных параметров СФЗ. Наилучшие результаты по наполненности и удлинению ВЭ показывают заряды с медными раскатанными облицовками с величиной прогиба в диапазоне значений 0,21...0,24. Результаты расчетов функционирования СФЗ по предложенной математической модели с принятыми в ней допущениями для описания моделей материалов штампованных и раскатанных кумулятивных облицовок достаточно хорошо согласуются с известными экспериментальными данными. В то же время важно отметить, что для получения более качественных результатов необходимо учитывать анизотропию физико-механических свойств материала кумулятивной облицовки в зависимости от технологии ее изготовления, что требуется отдельно рассмотреть более детально.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Селиванов В.В., ред. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. 2-е изд., испр. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, 506 с.
- [2] Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. *Наука и образование*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (дата обращения 14.02.2020).
- [3] Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>
- [4] Кудюков Н.А. Анализ влияния конструктивных параметров сегментных облицовок на взрывное формирование удлиненных высокоскоростных элементов. *Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, с. 711–713.

- [5] Круглов П.В., Болотина И.А. Технология изготовления дисковых заготовок переменной толщины для компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18968/2308-6033-2017-9-1674>
- [6] Колпаков В.И., Ладов С.В., Рубцов А.А. *Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 36 с.
- [7] Колпаков В.И. Особенности деформирования и разрушения удлиненных поражающих элементов при взрывном нагружении кумулятивных облицовок. *Тр. междунар. конф. «XIII Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (Саров, 14–18 марта 2011 г.)*. Саров, РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2012, с. 532–536.
- [8] Колпаков В.И., Баскаков В.Д., Шикун Н.В. Математическое моделирование функционирования снарядоформирующих зарядов с учетом технологических асимметрий. *Оборонная техника*, 2010, № 1–2, с. 82–89.
- [9] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 1. Москва, Физматлит, 2004, 823 с.
- [10] Колпаков В.И. Определение констант уравнения состояния продуктов детонации в форме Джонса–Уилкинса–Ли. *Известия РАН*, 2016, № 4 (28), с. 87–92.
- [11] Hussain G., Nameed A., Hetherington J.G., Barton P.C., Malik A.Q. Hydrocode Simulation with Modified Johnson-Cook Model and Experimental Analysis of Explosively Formed Projectiles. *J. of Energetic Materials*, 2013, no. 31, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453

Статья поступила в редакцию 23.03.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колпаков В.И., Кудюков Н.А. О влиянии технологии изготовления кумулятивной облицовки на характеристики высокоскоростного элемента. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-10-2020>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLIV Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства «Королёвские чтения — 2020», Москва, 29–31 января 2020 г.

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных публикаций в области численного моделирования динамических процессов. e-mail: kolpakov54@mail.ru

Кудюков Никита Андреевич — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных публикаций в области численного моделирования динамических процессов, призер III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов организаций-ассоциированных членов РАН «Молодежь. Наука. Инновации в оборонно-промышленном комплексе» (2019 г). e-mail: Nikka107@yandex.ru

On the influence of the shaped charge liner manufacture technology on the high-speed element characteristics

© V.I. Kolpakov, N.A. Kudyukov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper introduces the results of numerical simulation of the functioning of shaped charges, whose liners are made of different materials. As a result of their functioning, these charges form high-speed elements. Typically, liners for such charges are produced by the cold stamping technology. An alternative method for producing the liners is metal spinning. Moreover, a spin formed liner is expected to have higher physical and mechanical properties compared to a stamped liner made of the same material and having the same geometrical parameters. To reveal the patterns of molding high-speed elements from stamped and spin formed liners, the action of shaped charges comprised of steel or copper segmental liners of small bending, was simulated numerically using the apparatus of continuum mechanics. The influence of the liner manufacture method was taken into account by varying the values of the physical and mechanical characteristics of the liner material. The design parameters of the simulated charge, with the exception of the liner bending, during the calculation study remained unchanged and corresponded to the parameters of the currently used samples. Following the numerical experiments results, the study shows that the elements molded from spin formed liners are less likely to become fractured while being formed and are also more integral (continuous) in comparison to the elements molded from stamped shaped charge liners.

Keywords: *projectile-forming charge, high-speed element, shaped charge liner, manufacturing technology, stamping, metal spinning, numerical simulation*

REFERENCES

- [1] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy* [Ammunition]. In 2 vols., vol. 1. Moscow, BMSTU Publ., 2019, 506 p.
- [2] Kolpakov V.I. *Nauka i obrazovanie* (Science and Education), 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (accessed February 14, 2020).
- [3] Kruglov P.V., Kolpakov P.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>
- [4] Kudyukov N.A. *Analyz vliyaniya konstruktivnykh parametrov segmentnykh oblitsovok na vzrивnoye formirovaniye udlinennykh visokoskorostnykh elementov* [Analysis of the influence of segmental liner design parameters on explosive forming of high-speed elongated elements]. *Sbornik dokladov Dvenadtsatoy vserossiyskoy konferentsii moloykh uchyenykh i specialistov "Budushee mashinostroyeniya Rossii"* [Proc. of the All-Russian. Conf. "XII All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists 'Future of Russian Mechanical Engineering'"]. Moscow, 2019, pp. 711–713.
- [5] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9. <http://dx.doi.org/10.18968/2308-6033-2017-9-1674>
- [6] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Rubtsov A.A. *Matematicheskoe modelirovaniye funktsionirovaniya kumulyativnykh zaryadov* [Mathematical simulation of the functioning of shaped charges]. Moscow, BMSTU Publ., 1998, 36 p.
- [7] Kolpakov V.I. *Osobennosti deformirovaniya i razrusheniya udlinennykh porazhayuschykh elementov pri vzryvnom nagruzhении kumulyativnykh oblitsovok* [Features

- of deformation and destruction of elongated projectiles during explosive loading of shaped lining]. *Trudy mezhdunar. konf. "XIII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya. Ekstremalnye sostoyaniya veschestva. Detonatsiya. Udarnye volny"* (Sarov, 14–18 marta 2011 g.) [Proc. Int. Conf. "XIII Kharitonov thematic scientific readings. Extreme states of matter. Detonation. Shock Waves" (Sarov, March 14–18, 2011)]. Sarov, RFNC–VNIIEF Publ., 2012, pp. 532–536.
- [8] Kolpakov V.I., Baskakov V.D., Shikunov N.V. *Oboronnaya tekhnika (Defence technology)*, 2010, no. 1–2, pp. 82–89.
- [9] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. In 2 vols., vol. 1. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 823 p.
- [10] Kolpakov V.I. *Izvestiya RARAN (Proceedings of Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences)*, 2016, no. 4 (28), pp. 87–92.
- [11] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Barton P.C., Malik A.Q. Hydrocode Simulation with Modified Johnson-Cook Model and Experimental Analysis of Explosively Formed Projectiles. *J. of Energetic Materials*, 2013, no. 31, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453

Kolpakov V.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 research publications in the field of numerical simulation of dynamic processes. e-mail: kolpakov54@mail.ru

Kudyukov N.A., postgraduate, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 research publications in the field of numerical simulation of dynamic processes, prize-winner in The III All-Russian theoretical and practical conference of young scientists and specialists of organistaions – associated RARAS members "Young people. Science. Innovations in MIC" (2019). e-mail: Nikka107@yandex.ru