

Особенности процесса создания компактных элементов изменяемой формы из металлических облицовок

© П.В. Круглов, В.И. Колпаков, И.А. Болотина

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

Рассматриваются заряды, используемые для дистанционного разрушения бетонных, кирпичных стен зданий, сооружений, находящихся в аварийном состоянии. При детонации взрывчатого вещества заряда металлическая облицовка деформируется и летит на расстояние несколько сотен калибров заряда. В результате функционирования зарядов образуются компактные элементы изменяемой формы. В расчетах применялись медные облицовки переменной толщины, наружная и внутренняя поверхности которых образованы сочетанием сферических поверхностей. В качестве системы инициирования в заряде рассматривается плоскостной генератор с переменным углом наклона детонационной волны. Представлены результаты математического моделирования функционирования зарядов, определяющего влияние параметров заряда на эффективность действия. Эффективность зарядов определялась по параметрам компактного элемента — форме и его скорости. В данной статье также оценивалось влияние угла наклона плоскостного генератора на форму элемента. Получены зависимости скорости элемента и его удлинения от угла наклона сходящейся детонационной волны. Установлено, что при снижении угла наклона фронта сходящейся детонационной волны удлинение и скорость компактного элемента растут.

Ключевые слова: высокоскоростные компактные элементы, металлическая облицовка, плоскостной генератор детонационных волн, численное моделирование

Введение. Актуальной является задача разрушения в целях утилизации бетонных, кирпичных сооружений путем использования высокоскоростных компактных элементов (ВКЭ), меняющих свою форму в полете [1–11]. Для этого используются заряды (рис. 1), которые образуют из металлической облицовки, располагающейся выемкой в сторону разрушаемой преграды, компактный элемент [1–18].

Заряд (см. рис. 1) состоит из металлической кумулятивной облицовки (КО) 1, заряда взрывчатого вещества (ВВ) 2, корпуса 3 и детонатора 4. Компактные элементы образуются вследствие взрыва заряда взрывчатого вещества путем высокоскоростного деформирования металлических облицовок (рис. 2), изготовленных, как правило, из пластичных металлов.

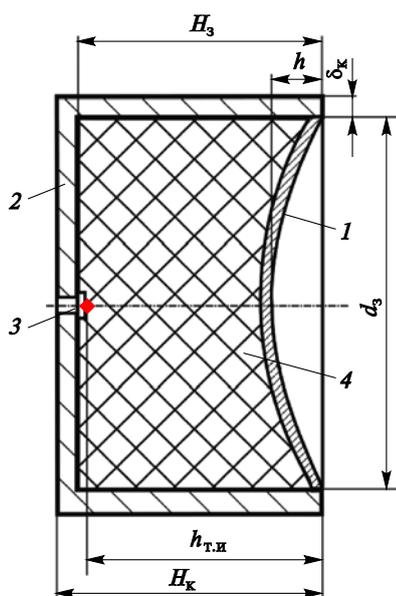


Рис. 1. Схема заряда:

H_3 — высота заряда ВВ; h — прогиб облицовки; δ_k — толщина корпуса, мм; d_3 — диаметр взрывчатого заряда, мм; H_k — высота корпуса заряда, мм; $h_{т.и}$ — расстояние от торца заряда до точки инициирования

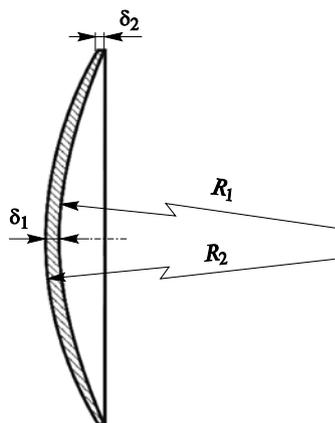


Рис. 2. Кумулятивная облицовка:

R_1 — радиус внутренней сферической поверхности; R_2 — радиус наружной сферической поверхности; δ_1 — толщина центральной части облицовки, мм; δ_2 — толщина периферийной части облицовки, мм

В качестве материалов облицовок современных зарядов используются следующие материалы: сплавы тантала, пластичные марки стали, а также медь [1–3, 7–10, 12, 13, 16–23]. Увеличение эффективности действия зарядов обеспечивается различными способами:

- улучшением параметров составов взрывчатых веществ заряда;
- оптимизацией формы заряда и КО [9, 10, 19, 24];
- проведением исследований перспективных удлиненных оперенных форм элементов [9, 10, 19–23];
- совершенствованием технологии изготовления КО [25–27];
- проведением анализа стадии проникания ВКЭ в преграду [26–30];
- изучением способов оптимизации процессов при проектировании операций сборки зарядов [31–36].

Одним из путей повышения эффективности действия зарядов является применение в их конструкции плоскостных генераторов [9, 10] (рис. 3), позволяющих инициировать ВВ по большей площади тыльной поверхности.

При инициировании заряда взрывчатого вещества из заряда в зависимости от конструктивных параметров формируется компактный (см. рис. 3) или удлиненный элемент. Преимуществом компактного элемента является его более высокая начальная скорость по сравнению с удлиненным, получаемым из облицовки той же массы.

Целью данной статьи является повышение эффективности зарядов, формирующих компактные элементы.

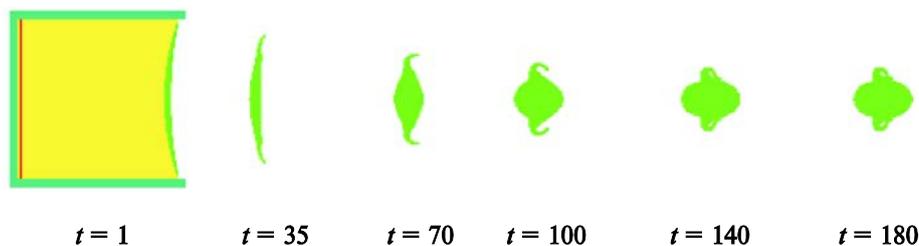


Рис. 3. Процесс формирования высокоскоростного компактного элемента взрывом заряда с плосковолновым генератором детонационных волн в разное время t , мкс

Методика расчета. Рассмотрим результаты исследований, выполненных на основе использования численных методов решения задач механики сплошной среды. В работе изучается характер влияния параметров инициирования зарядов на форму ВКЭ, полученных из медных облицовок.

В настоящей статье исследуются возможности управления формой и скоростью ВКЭ путем изменения наклона фронта детонационной волны при ее движении в заряде. Для этого в конструкции заряда предусматривается генератор волн переменной конфигурации с заданным углом наклона сходящейся волны к оси φ (рис. 4).

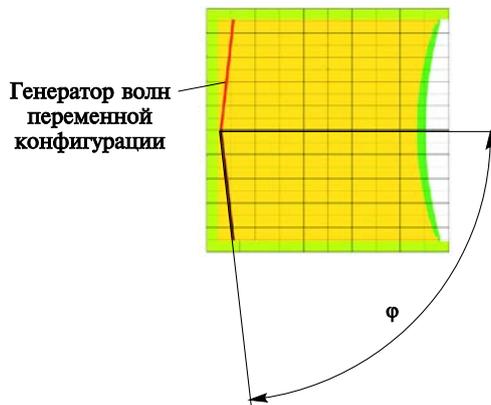


Рис. 4. Схема конструкции заряда с генератором волн переменной конфигурации с заданным углом наклона сходящейся волны к оси φ

Для определения параметров заряда, обеспечивающих получение ВКЭ, проводился вычислительный эксперимент, основанный на численном решении задач механики сплошной среды, для зарядов со следующими параметрами:

- диаметр заряда взрывчатого вещества (или внутренний диаметр корпуса) $d_3 = 125$ мм;

- высота корпуса заряда $H_k = 187$ мм;
- толщина корпуса $\delta_k = 6$ мм;
- диаметр облицовки $d = d_3 = 125$ мм;
- прогиб облицовки $h = 5 \dots 15$ мм;
- масса облицовки $m_{obl} = 0,35 \dots 0,42$ кг;
- угол наклона $\varphi = 83 \dots 90^\circ$;
- облицовка с переменной толщиной дегрессивной формы, $\delta_1 > \delta_2$;
- материалы: облицовка — медь марки М1; корпус — алюминий-магниево-магний сплав марки АМг6; ВВ — состав типа РВХ-9404, содержащий октоген.

Результаты расчетов. Как показали результаты математического моделирования, при инициировании зарядов образуются компактные элементы изменяемой формы. На отрезке времени от 10 до 140 мкс облицовка деформируется, постепенно приобретая компактную форму, близкую к сферической. После 140 мкс изменений формы практически нет, что свидетельствует о переходе материала элемента в упругое состояние. Параметры зарядов и результаты расчетов, согласно рассмотренным начальным данным, приведены в таблице.

Параметры зарядов и результаты расчетов функционирования зарядов

| Вариант расчета | Параметры зарядов | | | | | |
|-----------------|---|--|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
| | Толщина центральной части облицовки δ_1 , мм | Толщина периферийной части облицовки δ_2 , мм | Прогиб облицовки h , мм | Угол наклона φ , град | Масса облицовки m_{obl} , кг | Относительная скорость элемента $V_{эл}$, км/с |
| 1 | 7,0 | 1,2 | 6,0 | 90 | 0,42 | 2,94 |
| 2 | 7,0 | 1,2 | 6,0 | 87 | 0,42 | 2,97 |
| 3 | 7,0 | 1,2 | 6,0 | 85 | 0,42 | 2,99 |
| 4 | 7,0 | 1,2 | 6,0 | 83 | 0,42 | 3,00 |
| 5 | 6,5 | 0,5 | 4,6 | 83 | 0,35 | 3,19 |
| 6 | 6,0 | 1,0 | 5,0 | 87 | 0,35 | 3,25 |
| 7 | 6,0 | 1,0 | 5,0 | 85 | 0,35 | 3,27 |
| 8 | 6,0 | 0,5 | 4,3 | 83 | 0,33 | 3,33 |

На рис. 5 представлены результаты расчетов функционирования зарядов с использованием генераторов волн переменной конфигурации для оценки влияния угла наклона сходящейся волны φ на форму компактного элемента. Рисунки соответствуют вариантам расчета 1–4 таблицы. В конструкции данной группы зарядов различается угол φ . В базовом варианте (см. рис. 5, а) заряд был оснащен плоскоступовым генератором, у которого угол наклона равен $\varphi = 90^\circ$. В настоящей статье рассматриваются три варианта расположения генератора сходящихся волн, характеризуемого углом φ : 87° ; 85° ; 83° (см. рис. 5).

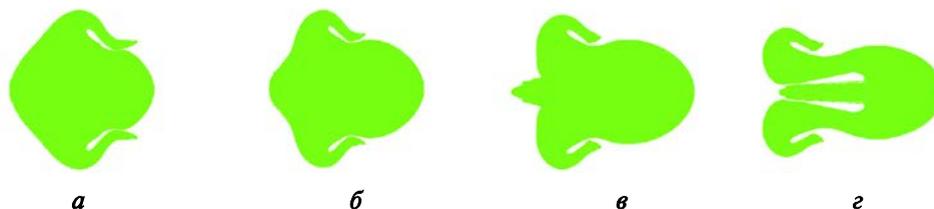


Рис. 5. Компактные элементы, полученные из зарядов с генератором волн различной конфигурации:
a — базовый вариант; $\varphi = 90^\circ$; варианты с различным углом φ : *б* — $\varphi = 87^\circ$; *в* — $\varphi = 85^\circ$;
г — $\varphi = 83^\circ$

Сравнивая форму ВКЭ на рис. 5, выявлено, что с уменьшением угла сходящейся волны φ возрастает удлинение элемента и характерно искажаются его контуры. В центральной части облицовки, которая при уменьшении угла наклона сходящейся волны вследствие более высокого давления от фронта детонационной волны получает большую скорость, происходит вытягивание элемента вдоль продольной оси.

На рис. 6, *a* показана зависимость изменения относительной скорости ВКЭ $V_{эл}^*$ от относительного угла наклона генератора сходящихся волн φ^* , рассчитываемых по формулам:

$$V_{эл}^* = V_{эл} / V_{эл.max};$$

$$\varphi^* = \varphi / 90^\circ,$$

где $V_{эл.max} = 3,0$ км/с.

Согласно результатам расчетов, выявлено, что при уменьшении угла наклона сходящейся волны растет скорость элемента. Данная зависимость аппроксимируется кривой:

$$V_{эл}^* = -0,25 \ln(\varphi^*) + 1,00.$$

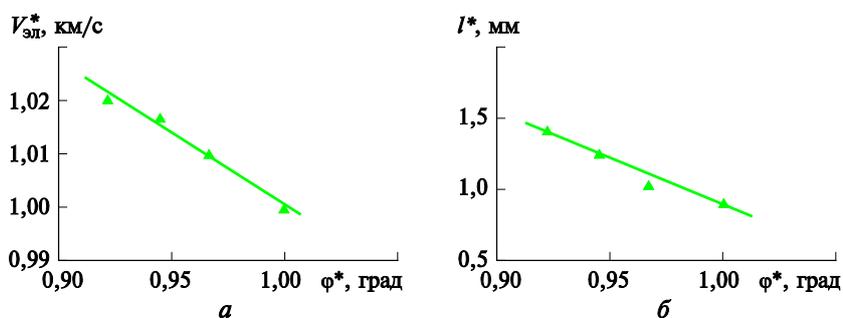


Рис. 6. Зависимость скорости ВКЭ (*a*) и удлинения (*б*) от угла наклона сходящихся волн

На рис. 6, б показана зависимость удлинения ВКЭ l^* от относительного угла наклона генератора сходящихся волн φ^* :

$$l^* = l_{\text{эл}} / d_{\text{эл}},$$

где $l_{\text{эл}}$ — длина элемента, мм; $d_{\text{эл}}$ — диаметр элемента, мм.

В соответствии с результатами моделирования удлинение элемента растет при снижении угла наклона сходящихся волн. Зависимость удлинения от угла наклона описывается уравнением регрессии:

$$l^* = -12,98 \ln(\varphi^*) + 1,75.$$

Возрастание удлинения для высокоскоростных компактных элементов может ухудшить устойчивость на траектории при наличии асимметрии функционирования заряда и привести к вращению элемента вокруг центра масс в плоскости полета. Поэтому при использовании генераторов сходящихся волн следует учитывать данное обстоятельство и подбирать такие параметры заряда, чтобы $l_{\text{эл}} \approx 1$.

При анализе результатов экспериментов авторами настоящей статьи также было замечено, что варьирование параметрами облицовки (толщиной в центральной и периферийной частями, прогибом), параметрами заряда (углом наклона сходящейся детонационной волны) приводило к появлению ВКЭ, сходных геометрически, но имеющих различную массу, скорость.

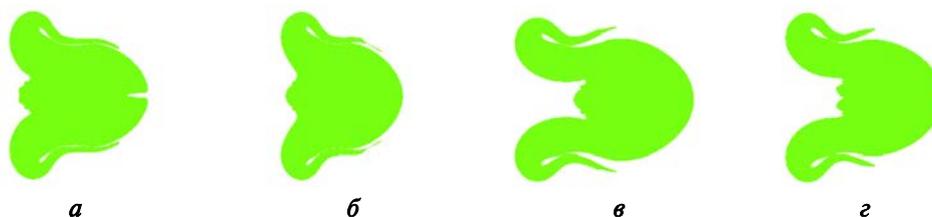


Рис. 7. Результаты моделирования ВКЭ с близкими формами и различными углами наклона фронта детонационной волны:

а, б — форма ВКЭ согласно вариантам 5, 6 таблицы соответственно; *в, г* — форма ВКЭ согласно вариантам 7, 8 таблицы соответственно

На рис. 7 представлены результаты обобщения ряда расчетов формы ВКЭ. Близкая форма элементов, полученных из зарядов с различными параметрами, свидетельствует о подобии характеристик ударно-волнового нагружения облицовок. Это явление позволяет разработчикам выбирать такие заряды, которые имеют наилучшие с точки зрения эффективности характеристики, например, выбрать заряд, обеспечивающий максимальную скорость элемента, или заряд с наименьшей массой.

Заключение. В данной статье приведены результаты математического моделирования функционирования зарядов с металлическими кумулятивными облицовками. При этом установлено, что помимо изменения толщины облицовки, ее прогиба, других параметров заряда для получения необходимой формы высокоскоростного компактного элемента в зарядах с созданием волн с переменной конфигурацией возможно управление формой элемента путем изменения наклона сходящейся детонационной волны. Показано, что снижение наклона сходящейся детонационной волны приводит к повышению удлинения элемента и его скорости. Также в ходе экспериментов было выявлено, что возможны конфигурации заряда с различной толщиной облицовки, способные обеспечить сходные геометрические параметры высокоскоростных компактных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. N.Y., John Wiley and Sons, 1989, 298 p.
- [2] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. 3-е изд., перераб. В 2 т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [3] Селиванов В.В., ред. *Боенприпасы*. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [4] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстротекающих процессов*. 2-е изд., испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 518 с.
- [5] Колпаков В.И., Ладов С.В., Рубцов А.А. *Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 68 с.
- [6] Федоров 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.
- [7] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. Compact element formation for the modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction elements in earth conditions. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, pp. 34–43.
- [8] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. Research of the explosive formation of a compact element for meteoroids fragments and space debris modeling. *Acta Astronautica*, 2019, vol. 163, pp. 84–90.
- [9] Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 12. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-12-1714
- [10] Круглов П.В., Колпаков В.И. Анализ влияния разнотолщинности профиля металлических сегментных облицовок на форму высокоскоростных удлиненных элементов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 7. DOI:10.18698/2308-6033-2018-7-1782
- [11] Weimann K. Research and development in the area of explosively formed projectiles charge technology. *Propellants, explosives, pyrotechnics*, 1993, vol. 18, iss. 5, pp. 294–298.

- [12] 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. *Journal of Energetic Materials*, 2013, no. 31, pp. 143–155. DOI: 10.1080/07370652.2011.606453
- [13] Pappu S., Murr L.E. Hydrocode and microstructural analysis of explosively formed penetrators. *Journal of materials science*, 2002, vol. 37, iss. 2, pp. 233–248.
- [14] Cardoso D., Teixeira-Dias F. Modelling the formation of explosively formed projectiles (EFP). *International Journal of Impact Engineering*, 2016, vol. 93, pp. 116–127. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.02.014
- [15] Wu J., Liu J., Du Y. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34, iss. 7, pp. 1147–1162.
- [16] Rolc S., Buchar J., Akstein Z. Computer simulation of explosively formed projectiles (EFP). In *Proc. of the 23th Int. Symp. on Ballistics*. Tarragona, Madrid, Spain, 16–20 April 2007, Universidad Politécnica de Madrid, International Ballistics Committee. Madrid, 2007, pp. 185–192.
- [17] 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. *Journal of Energetic Materials*, 2013, vol. 31, iss. 2, pp. 143–155.
- [18] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Malik A.Q., Sanaullah K. Analytical performance study of explosively formed projectiles. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, vol. 54, iss. 1, pp. 10–20.
- [19] Borkowski J., Wilk Z., Koslik P., Szymanczyk L., Zygmunt B. Application of sintered liners for explosively formed projectile charges. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 118, pp. 91–97.
- [20] Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. *Defense Technology*, 2014, no. 10, pp. 119–123. DOI: 10.1016/j.dt.2014.05.002
- [21] Bender D., Chhouk B., Fong R., Rice B., Volkmann E. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins. In: *19th International Symposium on Ballistics*. Interlaken, Switzerland, 7–11 May 2001, Defence Science and Technology Organization, the International Ballistics Committee. Interlaken, DEStech Publications, 2001, pp. 755–761.
- [22] Li W., Wang X., Li W. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, vol. 37, iss. 4, pp. 414–424.
- [23] Li R., Li W.B., Wang X.M. Effects of control parameters of three-point initiation on the formation of an explosively formed projectile with fins. *Shock Waves*, 2018, vol. 28, iss. 2, pp. 191–204.
- [24] Pappu S., Murr L.E. Shock deformation twinning in an iron explosively formed projectile. *Materials Science and Engineering*, 2000, vol. 284, iss. 1–2, pp. 148–157.
- [25] Круглов П.В., Болотина И.А. Технология изготовления дисковых заготовок переменной толщины для компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. DOI: 10.18968/2308-6033-2017-9-1674
- [26] Круглов П.В., Болотина И.А. Совершенствование технологии изготовления дисковых заготовок для металлических облицовок компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-8-1787
- [27] Круглов П.В., Сгибнев А.В. Выбор параметров технологических операций механической обработки на основе учета коэффициента вариации стойко-

- сти инструмента. *Наука и образование. Электронное научно-техническое издание*, 2014, № 6. DOI: 10.7463/0614.0714287
- [28] Hu F., Wu H., Fang Q., Liu J.C., Liang B., Kong X.Z. Impact performance of explosively formed projectile (EFP) into concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, vol. 109, pp. 150–166.
- [29] Bookout L., Mulligan P., Baird J. Explosively formed projectile soft-recovery force analysis. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 58, pp. 560–569.
- [30] Zhu C.S., Huang Z.X., Zu X.D., Xiao Q.Q. Mach wave control in explosively formed projectile warhead. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, vol. 39, iss. 6, pp. 909–915.
- [31] Hu F., Wu H., Fang Q., Liu J.C. Impact resistance of concrete targets pre-damaged by explosively formed projectile (EFP) against rigid projectile. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 122, pp. 251–264.
- [32] Гелин Д.В., Лысов Д.А., Марков В.А., Марков И.В., Сотский М.Ю., Селиванов В.В. Новые технические решения для получения дополнительной информации о нестационарных процессах в баллистических опытах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2018-3-1747
- [33] Круглов П.В., Сгибнев А.В. Автоматизация контрольных, испытательных и регулировочных работ после сборки автоматических систем. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, № 3, с. 140–147.
- [34] Круглов П.В., Тарасов В.А. Метод генерации проектных решений сборки изделий с применением ориентированных гиперграфов. *Наука и образование. Электронное научно-техническое издание*, 2012, № 1. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/260312.html> (дата обращения 20.06.2018).
- [35] Круглов П.В., Тарасов В.А., Болотина И.А. Метод формирования совокупности допустимых вариантов сборки изделий на основе применения ориентированных гиперграфов. *Наука и образование. Электронное научно-техническое издание*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/339658.html> (дата обращения 20.06.2018).
- [36] Круглов П.В., Болотина И.А. Применение ориентированных гиперграфов ограничений при проектировании технологии изготовления высокоточных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2016-05-1494

Статья поступила в редакцию 26.10.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Круглов П.В., Колпаков В.И., Болотина И.А. Особенности процесса создания компактных элементов изменяемой формы из металлических облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 11.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-11-1929>

Круглов Павел Владимирович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: kpv17@bmstu.ru

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: kolpakov54@mail.ru

Болотина Ирина Алексеевна — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: bolotina_i@bmstu.ru

Specifics of generating explosively formed projectiles of variable shape from metal liners

© P.V. Kruglov, V.I. Kolpakov, I.A. Bolotina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

We propose using charges generating explosively formed projectiles of variable shape to remotely demolish structurally unsound concrete or brick walls of buildings and other structures. The paper considers the charges required, their design and operation. The operation of such a charge involves the explosive material accelerating a metal liner, covering a distance of up to several hundred charge diameters. The metal liner deforms while moving and assumes a compact shape. We used variable thickness copper liners, the external and internal surfaces of which are formed by a combination of spherical surfaces. A planar shock wave generator featuring a variable detonation wave slope is considered as the initiation system for the charge. We present the results of numerically simulating our explosive charge operation in order to determine how charge parameters affect performance. We estimated charge performance via two projectile parameters: its shape and velocity. The study also evaluated the effect of the planar shock wave generator slope on the projectile shape. We obtained projectile velocity and aspect ratio as functions of the slope of the converging detonation wave. We determined that decreasing the slope of the converging detonation wave front leads to an increase in the aspect ratio and velocity of the explosively formed projectile.

Keywords: numerical simulation, high-velocity explosively formed projectile, metal liner, planar detonation wave generator

REFERENCES

- [1] Walters W.P., Zukas J.A. *Fundamentals of Shaped Charges*. New York, John Wiley and Sons Publ., 1989, 298 p.
- [2] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., et al. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. Orlenko L.P., ed. 3rd edition. In 2 vols. Vol. 2. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, 656 p.
- [3] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F., et al. *Boepripasy* [Munitions]. In 2 vols. Vol. 1. Selivanov V.V., ed. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [4] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov* [Numerical methods in problems of physics of high-speed processes]. 2nd ed., revised. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 518 p.
- [5] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Rubtsov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya kumulyativnykh zaryadov* [Mathematical simulation of shaped charge operation]. Moscow, BMSTU Publ., 1998.
- [6] Fedorov S.V., Bayanova Ya.M., Ladov S.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 1, pp. 150–164.
- [7] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. *Acta Astronautica*, 2017, no. 135, pp. 34–43.
- [8] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Ya.M., Ladov S.V. *Acta Astronautica*, 2019, no. 163, pp. 84–90.
- [9] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>

- [10] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 7.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-7-1782>
- [11] Weimann K. *Propellants, explosives, pyrotechnics*, 1993, no. 18 (5), pp. 294–298.
- [12] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Barton P.C., Malik A.Q. *J. of Energetic Materials*, 2013, no. 31, pp. 143–155.
DOI: 10.1080/07370652.2011.606453
- [13] Pappu S., Murr L.E. *Journal of Materials Science*, 2002, no. 37 (2), pp. 233–248.
- [14] Cardoso D., Teixeira-Dias F. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, no. 93, pp. 116–127.
- [15] Wu J., Liu J., Du Y. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, no. 34 (7), pp. 1147–1162.
- [16] Rolc S., Buchar J., Akstein Z. Computer simulation of explosively formed projectiles (EFP). *Proc. of the 23th Int. Symp. on Ballistics*, 2007, pp. 185–192.
- [17] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Barton P.C., Malik A.Q. *Journal of Energetic Materials*, 2013, no. 31 (2), pp. 143–155.
- [18] Hussain G., Hameed A., Hetherington J.G., Malik A.Q., Sanaullah K. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, no. 54 (1), pp. 10–20.
- [19] Borkowski J., Wilk Z., Koslik P., Szymanczyk L., Zygmunt B. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, no. 118, pp. 91–97.
- [20] Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. *Defense Technology*, 2014, no. 10, pp. 119–123.
DOI:10.1016/j.dt.2014.05.002
- [21] Bender D., Chhouk B., Fong R., Rice B., Volkmann E. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins. *19th Int. Symp. on Ballistics*. Interlaken, Switzerland, 2001, pp. 755–761.
- [22] Li W., Wang X., Li W. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, no. 37 (4), pp. 414–424.
- [23] Li R., Li W.B., Wang X.M. *Shock Waves*, 2018, no. 28 (2), pp. 191–204.
- [24] Pappu S., Murr L.E. *Materials Science and Engineering*, 2000, no. 284 (1–2), pp. 148–157.
- [25] 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>
- [26] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 8.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-8-1787>
- [27] Kruglov P.V., Sgibnev A.V. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2014, no. 6. DOI: 10.7463/0614.0714287
- [28] Hu F., Wu H., Fang Q., Liu J.C., Liang B., Kong X.Z. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, no. 109, pp. 150–166.
- [29] Bookout L., Mulligan P., Baird J. *Procedia Engineering*, 2013, no. 58, pp. 560–569.
- [30] Zhu C.S., Huang Z.X., Zu X.D., Xiao Q.Q. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, no. 39 (6), pp. 909–915.
- [31] Hu F., Wu H., Fang Q., Liu J.C. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, no. 122, pp. 251–264.
- [32] Gelin D.V., Lysov D.A., Markov V.A., Sotskiy M.Yu., Selivanov V.V., Gelin N.D., Sotskaya M.M. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 3.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-3-1747>
- [33] Kruglov P.V., Sgibnev A.V. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 3, pp. 140–147.

- [34] Kruglov P.V., Tarasov V.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2012, no. 1. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/260312.html> (accessed June 20, 2018).
- [35] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Bolotina I.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana — Science and Education: Scientific Edition of Bauman MSTU*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/339658.html> (accessed June 20, 2018).
- [36] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-05-1494>

Kruglov P.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 scientific publications in the field of special-purpose mechanical engineering technologies.
e-mail: kpv17@bmstu.ru

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

Bolotina I.A., Assist. Lecturer, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 scientific publications in the field of mechanical engineering technologies, has 8 inventor's certificates.
e-mail: bolotina_i@bmstu.ru