

УДК 534.222.2(634.454)

ВЗРЫВНЫЕ МЕТАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА КУМУЛЯТИВНОГО ТИПА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КОМПАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. И. Герасимов^{1,2,3,4}, Д. В. Маляров¹, А. Г. Сироткина², С. А. Капинос¹,
А. П. Калмыков^{1,4}, А. С. Князев¹

¹РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, s.i.gerasimov@mail.ru

²Саровский физико-технический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 607186 Саров

³Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева
603950 Нижний Новгород

⁴Институт проблем машиностроения РАН — филиал Института прикладной физики РАН
603024 Нижний Новгород

Представлен обзор способов и устройств высокоскоростного метания, предназначенных для экспериментального исследования защиты приборов и конструкций от высокоскоростного удара компактными элементами, в частности защиты космических аппаратов от соударения с метеоритными частицами естественного происхождения. Приведены схемы взрывных метательных устройств, используемых в экспериментах по отработке защитных конструкций при высоких скоростях соударения. Представлены результаты численных и экспериментальных исследований этих схем.

Ключевые слова: взрывное метательное устройство, компактный элемент, кумулятивная облицовка, кавитационный заряд, детонационная волна.

DOI 10.15372/FGV20200413

ВВЕДЕНИЕ

Защита приборов и конструкций от удара частицами с высокими скоростями является важной задачей в различных областях деятельности, в том числе в космическом приборостроении. Для определения реакции сложных конструкций на высокоскоростной удар компактными элементами (КЭ) не всегда достаточно расчетных методов, часто требуются непосредственные экспериментальные исследования. Для их проведения в наземных условиях необходимы устройства, позволяющие разгонять более чем до 5 км/с компактные металлические элементы массой от долей грамма до нескольких десятков граммов.

Для этой цели можно использовать пороховые и легкогазовые пушки, электромагнит-

ные ускорители, а также взрывные метательные устройства различных типов. Наиболее полный обзор способов высокоскоростного метания представлен в работах [1–6]. Одними из перспективных для решения указанных задач являются взрывные метательные устройства (ВМУ) кумулятивного типа, принцип действия которых основан на формировании высокоскоростной кумулятивной струи путем взрывного обжата облицовки (или схлопывания выемки) с последующей отсечкой ее головной части, т. е. формированием собственно КЭ. Эти устройства являются одноразовыми разрушаемыми конструкциями, не требующими сложных систем позиционирования (сталелей), обслуживания, газообеспечения, мощных накопителей энергии и т. п., что делает удобным их использование, в том числе и на необорудованных полигонах. Важным преимуществом ВМУ является возможность создания установок, обеспечивающих групповое воздействие КЭ на объект испытаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00715).

© Герасимов С. И., Маляров Д. В., Сироткина А. Г., Капинос С. А., Калмыков А. П., Князев А. С., 2020.

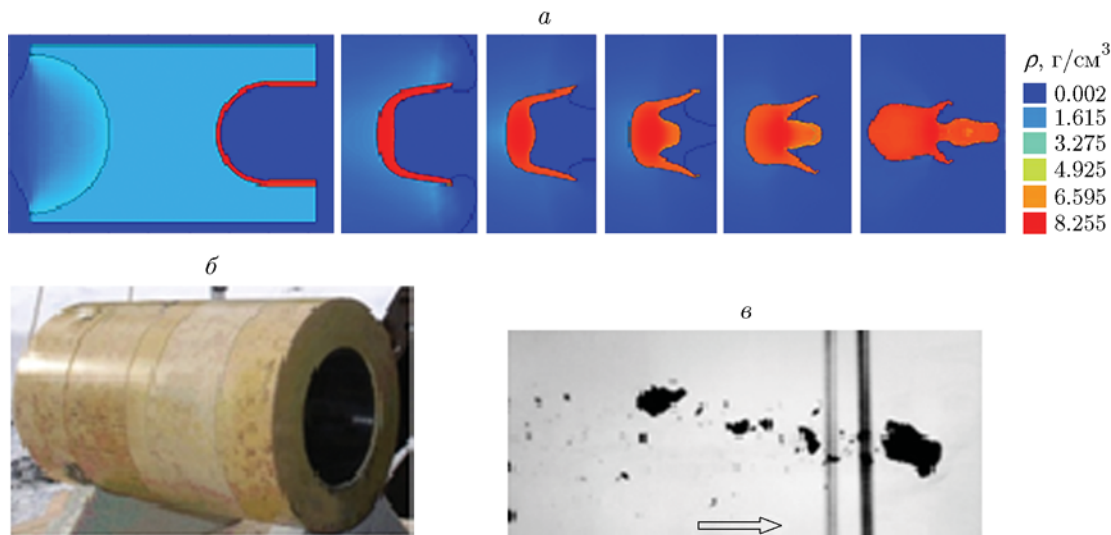


Рис. 1. ВМУ типа полусфера — цилиндр:

a — результаты расчета, *б* — фотография устройства, *в* — рентгенограмма сформированного КЭ

В статье представлены ВМУ, формирующие металлические элементы массой от долей до десятков граммов со скоростями движения до 9.5 км/с.

1. ФОРМИРОВАНИЕ КЭ ПУТЕМ СХОЖДЕНИЯ К ОСИ КУМУЛЯТИВНОЙ ОБЛИЦОВКИ

В настоящем параграфе представлены схемы метания, использующие для формирования КЭ кумулятивные облицовки. Принцип их действия близок к работе обычного кумулятивного заряда с притупленной облицовкой.

1.1. Взрывное метательное устройство с облицовкой в форме полусфера — цилиндр [7], впервые предложенное в 60-х годах прошлого века, является наиболее простым и надежно работающим устройством для получения высокоскоростных КЭ. Оно представлено на рис. 1 [8]. При инициировании цилиндрического заряда взрывчатого вещества (ВВ) по нему распространяется детонационная волна, под действием давления которой облицовка сходится к оси. При этом из полусферической части облицовки формируется относительно толстая кумулятивная струя, а под воздействием сходящейся цилиндрической части формируется требуемое распределение скорости в струе — безградиентный головной участок и высокоградиентная «шейка». В результате такого распределения скорости головной участок струи отделяется от растягивающейся и разрушающейся в полете «шейки», образуя КЭ. Работа ВМУ проиллю-

стрирована результатами численного расчета. Типовая рентгенограмма КЭ, сформированного этим типом ВМУ, представлена на рис. 1.

Экспериментально отработан ряд ВМУ с облицовкой типа полусфера — цилиндр, формирующих стальные КЭ массой 10 ÷ 65 г со скоростью движения 4.7 ÷ 6.4 км/с. На базе этой схемы метания показано, что при масштабном (пропорциональном) изменении размеров ВМУ пропорционально изменяются размеры, а следовательно, и масса формируемого КЭ при сохранении его скорости [9].

Исследования, направленные на увеличение скорости формируемых КЭ в этом типе устройств, представлены в [10–13]. Был изучен процесс схлопывания облицовок различных форм (полусфера, полуэллипсоид, сферический сегмент, усеченная сфера). Показано, что при переходе от постоянной к дегрессивной толщине струеобразующей части облицовки возможно перераспределение энергии с повышением скорости формируемого КЭ при снижении его массы.

1.2. Чем выше давление, нагружающее облицовку в ВМУ, тем более высокую скорость приобретет формируемый из нее КЭ. В качестве одного из путей повышения давления предложено использовать трехударную конфигурацию (с ножкой Маха), являющуюся результатом нерегулярного отражения сходящихся детонационных волн. Эта идея реализована в схеме метания, представленной на рис. 2

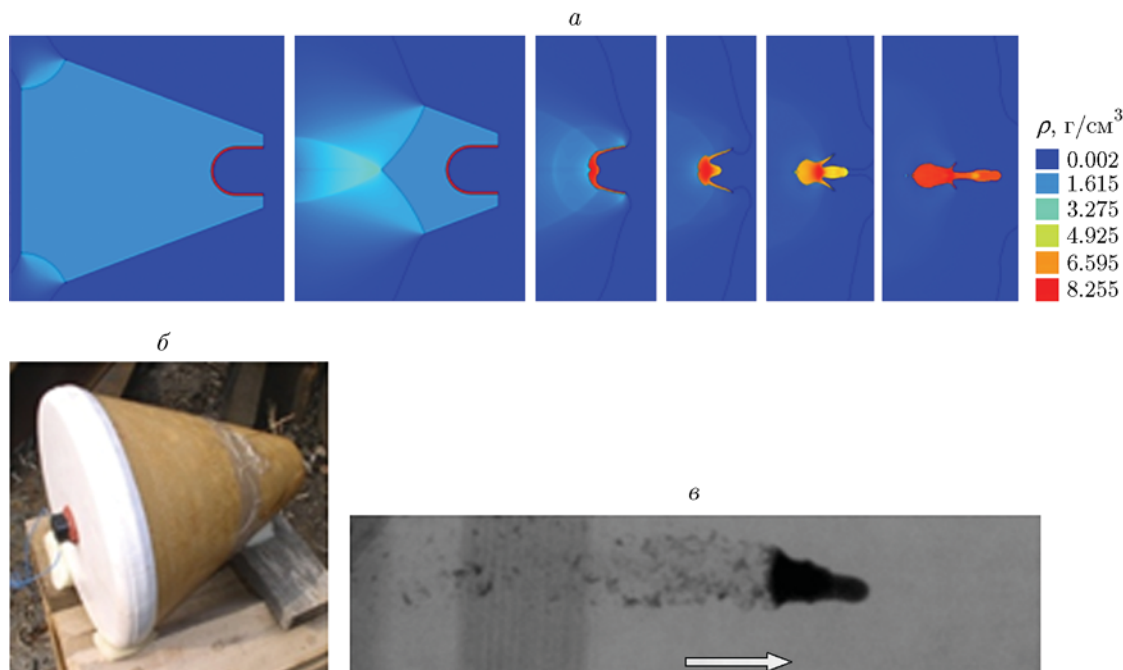


Рис. 2. Устройство метания детонационной волной трехударной конфигурации:

a — результаты расчета, *б* — фотография устройства, *в* — рентгенограмма сформированного КЭ

[14]. Используется заряд ВВ в форме усеченного конуса. На торце меньшего основания заряда расположена выемка с облицовкой в форме полусфера — цилиндр. На большем основании заряда ВВ установлена детонационная разводка для обеспечения его инициирования по торцевой кромке. При таком подрыве заряда ВВ генерируется сходящаяся детонационная волна. Она отражается от оси с формированием детонационной волны Маха, давление за которой выше давления стационарной детонации. Этой пересжатой волной нагружается облицовка в форме полусфера — цилиндр. Ее схлопывание и формирование КЭ происходят аналогично ВМУ типа полусфера — цилиндр. Экспериментально показана работоспособность ВМУ, формирующего стальной КЭ массой 12 г, движущийся со скоростью ≈ 8.0 км/с. Его рентгенограмма приведена на рис. 2. Недостатком рассмотренной схемы метания является большое количество ВВ. Это обусловлено тем, что трехударная конфигурация эволюционирует в конусе с малым углом раствора (в диапазоне $7.0 \div 9.5^\circ$ для различных ВВ), и для достижения требуемого диаметра волне надо пройти значительное расстояние, которое и определяет длину заряда. Для уменьшения длины и, соответственно, массы заряда ВВ необходимо уве-

личить угол раствора конуса. Также выдвинуто предположение, что разгон и схлопывание облицовки можно осуществлять не только детонационной, но и ударной волной. При этом необходимо обеспечить ее высокую амплитуду и требуемую длительность.

1.3. Эта идея реализована в схеме метания, показанной на рис. 3 [15]. В полость заряда ВВ помещается втулка из непористого конструкционного материала с низкой акустической жесткостью. В этой втулке имеется полость с облицовкой в форме полусфера — цилиндр. В заряде ВВ, аналогично предыдущей схеме метания, генерируются сходящиеся детонационные волны и возникает трехударная конфигурация. Во втулке формируется аналогичная конфигурация мощных ударных волн. При этом угол конуса получается существенно больше (около 30° для полиэтилена). Облицовка нагружается и схлопывается, формируя, аналогично предыдущему устройству, высокоскоростной КЭ.

Расчетно и экспериментально отработаны две конструкции устройств, формирующих стальные КЭ массой 2 и 14 г со скоростью движения 8.8 и 8.5 км/с соответственно. Их рентгенограммы приведены на рис. 3.

Данная схема метания обладает следую-

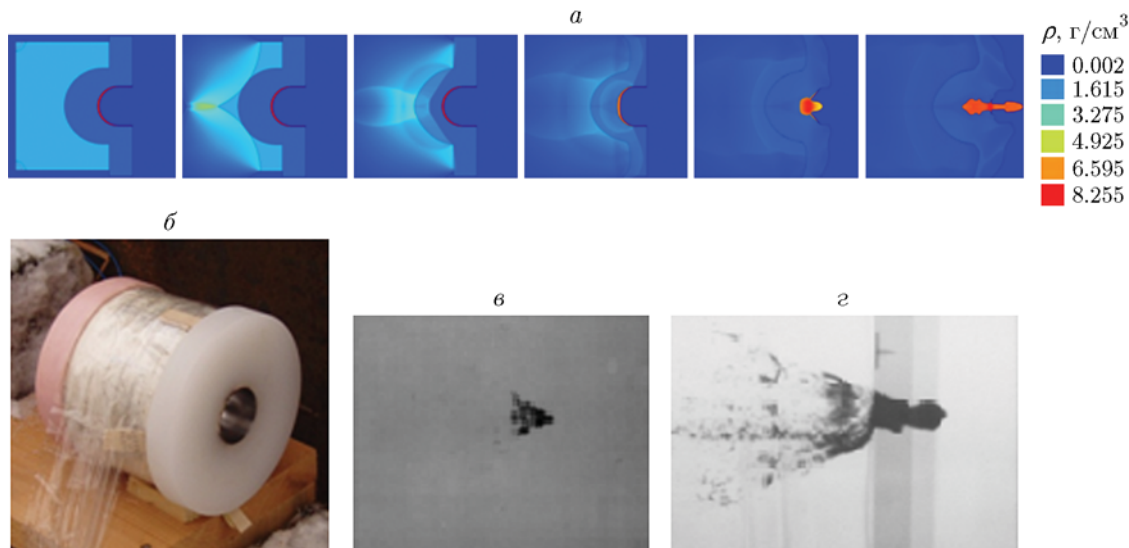


Рис. 3. Устройство метания ударной волной Маха:

а — результаты расчета, *б* — фотография устройства, *в, г* — рентгенограммы сформированного КЭ в разные моменты времени

щей особенностью. Маховская ударная волна при движении по материалу втулки увеличивается в диаметре, но снижается по амплитуде. Таким образом, располагая облицовку глубже во втулке, можно получать относительно мелкие, но скоростные КЭ, тогда как смещая ее в сторону торца, можно получать более массивные, но менее скоростные КЭ. При этом необходимо изменять и размеры облицовок.

1.4. Еще одним способом получения высоких скоростей метания является использование кумуляции в слоистых системах. Эффект заключается в усилении параметров ударной волны при прохождении системы чередующихся «легких» и «тяжелых» слоев, в которой толщина каждого последующего слоя меньше предыдущего [16]. Существенно усилить эффект позволяет использование ВВ в качестве «легкого» слоя. В работе [17] предложено в облицовку ВМУ полусфера — цилиндр поместить вкладыш — облицовку аналогичной формы, покрытую слоем пластического ВВ. Под действием продуктов взрыва заряда ВВ облицовка ускоряется и инициирует слой пластического ВВ вкладыша. Схлопывание облицовки вкладыша происходит аналогично схлопыванию основной облицовки ВМУ полусфера — цилиндр. При этом формируется КЭ меньшей массы, но большей скорости. Расчетно и экспериментально отработаны конструкции устройств, формирующих стальные КЭ массой

9 г, движущиеся со скоростью 6.6 км/с, и алюминиевые КЭ массой 0.7 г со скоростью движения 9.5 км/с. На рис. 4 показан расчет работы устройства, его фотография и рентгенограммы стального и алюминиевого КЭ. Основным преимуществом устройств на базе этой схемы метания является возможность относительно простого изменения параметров КЭ. Для этого необходимо изготовить всего одну деталь — облицовку вкладыша. При этом наиболее трудоемкое изделие, а именно ВМУ типа полусфера — цилиндр, остается неизменной.

Таким образом, показано, что для формирования высокоскоростных КЭ можно использовать кумулятивный эффект, возникающий при схождении к оси металлических облицовок с притупленной вершиной.

2. ФОРМИРОВАНИЕ КЭ В РЕЗУЛЬТАТЕ СХЛОПЫВАНИЯ ВЫЕМКИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ОБРАЗЦЕ

Для получения высокоскоростных КЭ рассмотрен класс кумулятивных метательных устройств, использующих схлопывание выемки в металлическом образце. Данные устройства состоят из металлического образца с выемкой и генератора ударной волны. Генератор формирует в образце плоскую мощную ударную волну, под действием которой выемка схлопывается, подобно облицовке кумулятивного заряда, формируя при этом высо-

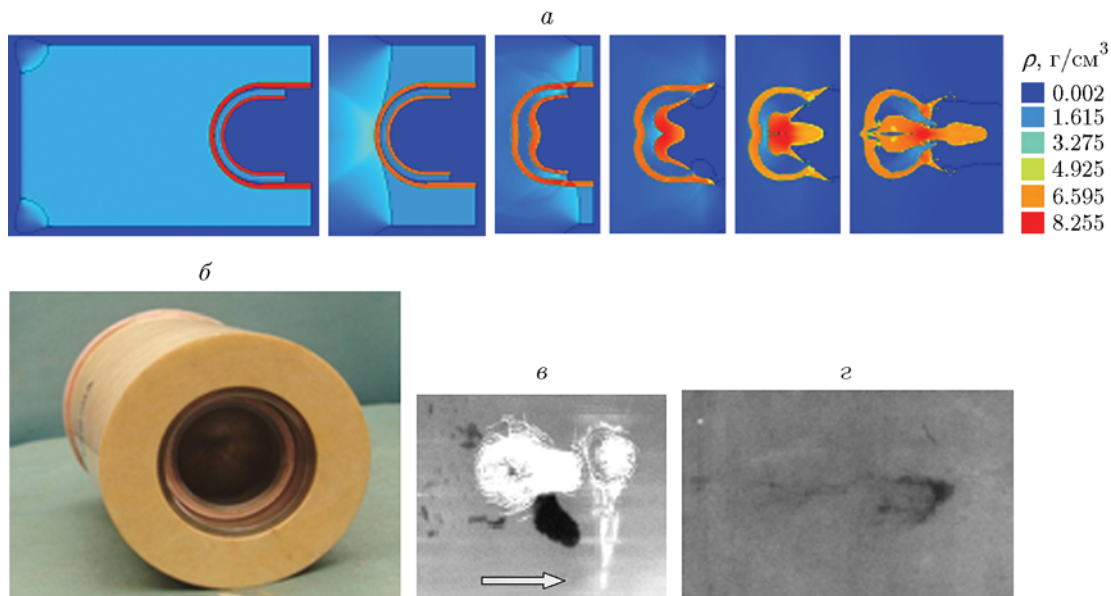


Рис. 4. Устройство метания с вкладышем:

a — результаты расчета, *б* — фотография устройства, *в* — рентгенограмма сформированного стального КЭ, *г* — рентгенограмма сформированного алюминиевого КЭ

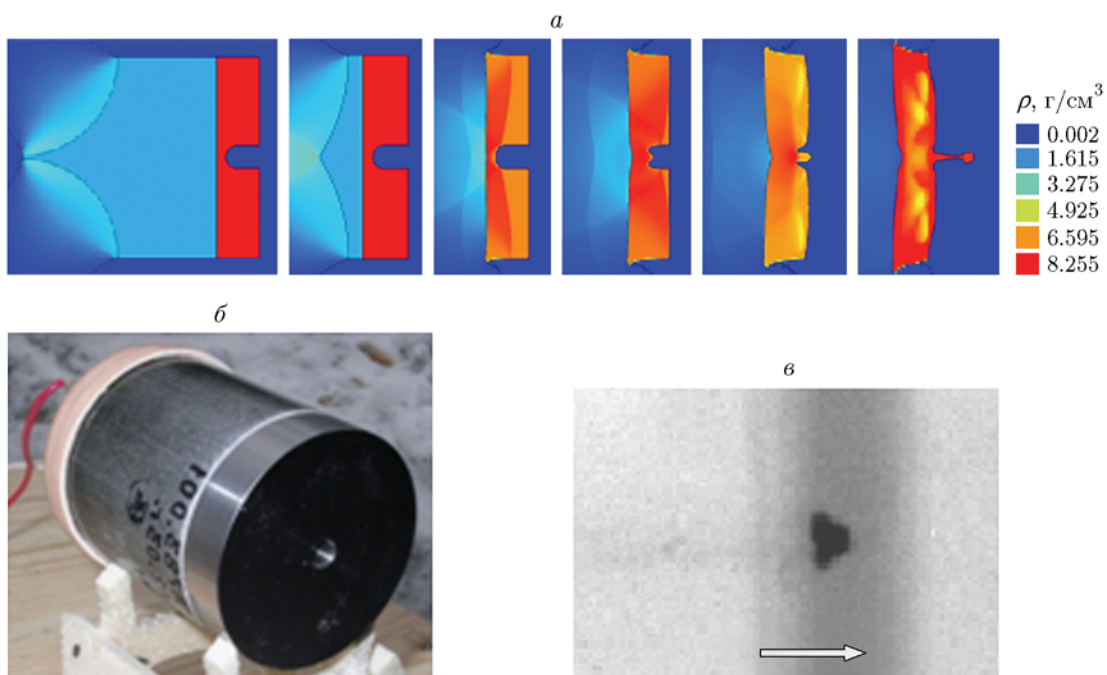


Рис. 5. Устройство, использующее детонационную волну трехударной конфигурации:

a — результаты расчета, *б* — фотография устройства, *в* — рентгенограмма сформированного стального КЭ

коскоростную кумулятивную струю, головная часть которой образует КЭ. Применение различных генераторов ударной волны позволяет получать различные скорости метания. Особенностью описанных схем является возмож-

ность полного устранения затекания продуктов детонации в область перед металлическим образцом, где может быть установлен объект испытаний. Это позволяет проводить исследование взаимодействия КЭ с различными прегра-

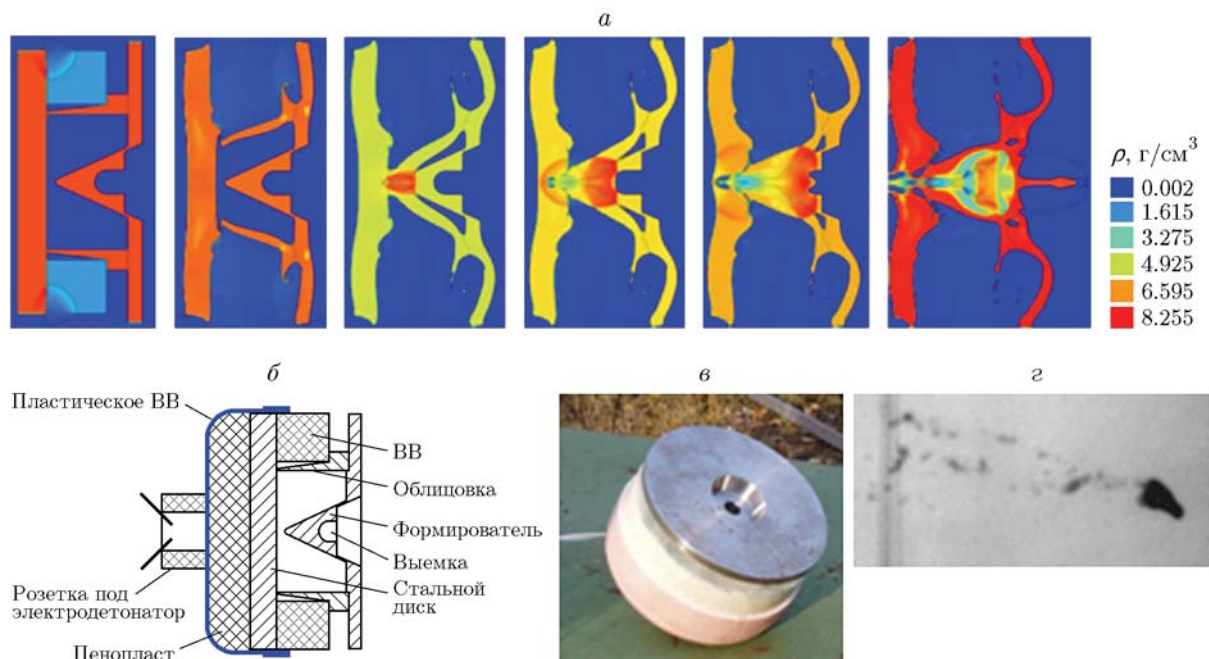


Рис. 6. Устройство, создающее маховскую ударную волну в коническом формирователе с помощью удара сходящейся облицовкой:

a — результаты расчета, *б* — схема конструкции, *в* — фотография устройства, *г* — рентгенограмма сформированного стального КЭ

дами в условиях вакуума.

2.1. В литературе [18–20] описаны устройства, использующие в качестве генератора ударной волны контактный подрыв ВВ, т. е. нагружающие образец с выемкой стационарной детонационной волной. Для повышения скорости метания предложено использовать трехударную конфигурацию, давление в которой выше давления стационарной детонации. Такая схема метания [21] представлена на рис. 5. Применяются цилиндрический заряд ВВ, детонационная разводка, аналогичная показанным ранее устройствам, и металлический диск с выемкой. При инициировании заряда по торцевой кромке формируются сходящиеся детонационные волны и возникает трехударная конфигурация. В металлическом диске формируется аналогичная конфигурация мощных ударных волн, под воздействием которых выемка схлопывается, образуя высокоскоростную кумулятивную струю. Подобрать параметры выемки, можно получить утолщенную безградиентную головную часть струи, которую можно рассматривать как КЭ. На рис. 5 приведены результаты расчета такого устройства и типичные рентгенограммы формируемых ими КЭ.

Расчетно и экспериментально исследованы конструкции устройств, в которых используются одинаковые заряды ВВ, но различные по размеру выемки. Получено, что при уменьшении размера выемки уменьшается масса формируемого КЭ, но увеличивается его скорость. Отработаны конструкции ВМУ, которые формируют стальные КЭ массой $0.02 \div 0.25$ г, движущиеся со скоростью $8.0 \div 6.7$ км/с.

Также была исследована возможность формирования в этой схеме метания компактных элементов из титанового сплава. Экспериментально получены КЭ из титанового сплава массой около 0.08 г со скоростью движения 9 км/с.

Несомненными достоинствами рассматриваемой схемы метания являются ее простота и технологичность изготовления, а также возможность получения КЭ из разных материалов различной массы и скорости.

2.2. На рис. 6 представлена схема метания [22], в которой реализована идея создания маховской ударной волны в коническом формирователе с помощью удара сходящейся облицовкой. Кольцевой заряд ВВ, инициируемый с помощью детонационной разводки, метает к

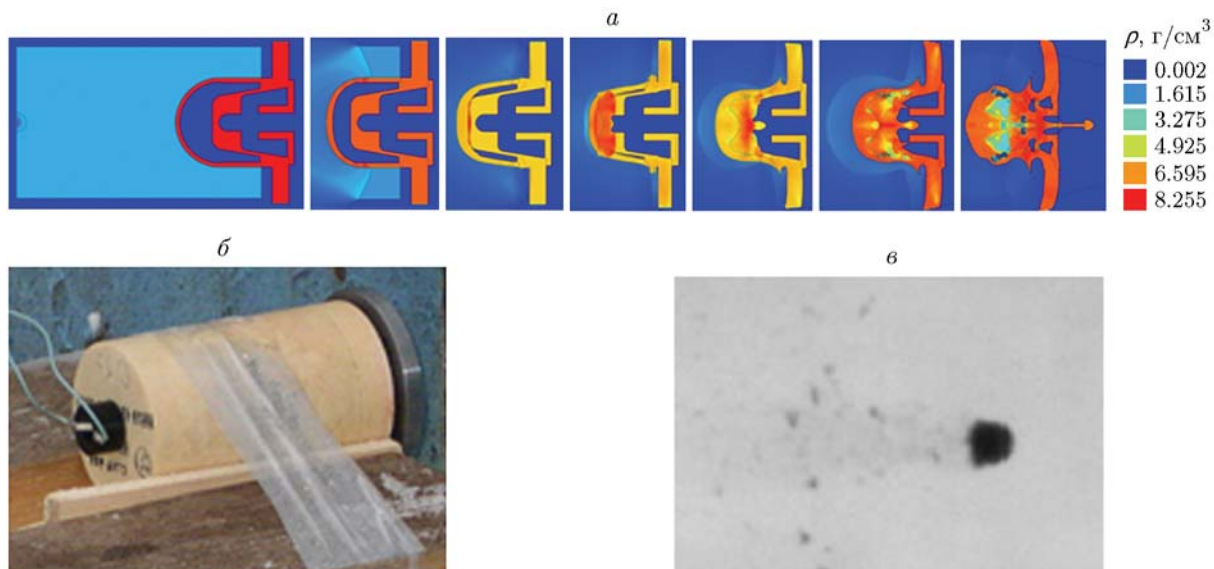


Рис. 7. Устройство, создающее маховскую ударную волну ударом центральной части облицовки: *а* — результаты расчета, *б* — фотография устройства, *в* — рентгенограмма сформированного стального КЭ

оси облицовку переменной толщины. Разнотолщинность облицовки определяет градиент скорости схождения по ее длине и, следовательно, угол разворота (т. е. конусности) в момент удара по формирователю. При взаимодействии облицовки с конической поверхностью формирователя в последнем возникает сходящаяся коническая ударная волна, которая, отражаясь от оси, образует ножку Маха — ударную волну высокой амплитуды. Под ее воздействием выемка схлопывается аналогично работе предыдущего устройства, формируя КЭ. На рис. 6 показаны результаты расчета работы устройства. Экспериментально отработана конструкция ВМУ, формирующая стальной КЭ массой около 0.23 г со скоростью движения 7.1 км/с. Рентгенограмма КЭ также приведена на рис. 6.

Основным преимуществом этой схемы метания является ее высокая эффективность: для получения сравнимых с предыдущей схемой метания параметров КЭ здесь требуется примерно в два раза меньшая масса ВВ.

2.3. Еще одним способом создания мощной плоской ударной волны является удар телом, предварительно разогнанным до высокой скорости. В качестве такого тела предложено использовать полусферическую часть облицовки полусфера — цилиндр метательного устройства. Было замечено, что к определенному моменту времени сферическая часть облицовки набирает скорость ≈ 4 км/с и имеет практиче-

ски плоский участок. Этот участок при ударе о стальной диск ВМУ генерирует в нем плоскую ударную волну интенсивностью ≈ 130 ГПа. Следовательно, необходимо расположить диск ВМУ внутри облицовки таким образом, чтобы его торец нагружался плоским участком схлопывающейся облицовки. В итоге получается двухкаскадная схема метания [23]. Она состоит из ВМУ типа полусфера — цилиндр и металлической втулки, вставляемой внутрь его облицовки. Также в конструкцию устройства входит трубчатый отсекающий, служащий для отсечки паразитной кольцевой кумулятивной струи, которая может догонять и разрушать сформированный КЭ. На рис. 7 показана динамика работы устройства, его внешний вид и типовая рентгенограмма формируемого им КЭ.

Расчетно и экспериментально отработан ряд конструкций устройств с различными размерами выемок и использованием в качестве первого каскада различных по масштабу ВМУ типа полусфера — цилиндр. Аналогично устройству, описанному в п. 2.1, показано, что при уменьшении размеров выемки уменьшаются размеры и масса формируемого КЭ при увеличении его скорости. Экспериментально подтвержденные параметры метания стальных КЭ, полученные на базе этой схемы метания, составляют: масса $0.02 \div 5.7$ г, скорость $7.4 \div 9.5$ км/с.

Представленная на рис. 7 схема метания, как и предыдущие, позволяет формировать КЭ из различных металлов и сплавов. Так, при использовании в качестве материала втулки алюминиевого сплава экспериментально зарегистрирована скорость частиц 10.6 км/с, однако добиться сохранности элемента не удалось по причине активно протекающих процессов абляции и горения в воздухе. Для применения таких ударников в исследованиях необходимо наличие вакуумированных трасс, оснащенных системой бесконтактной регистрации параметров движения КЭ, в качестве которой, например, можно использовать электромагнитную хронографическую систему [24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для получения высокоскоростных металлических компактных элементов можно использовать нагружение образца с выемкой мощной ударной волной. При этом в зависимости от вида генератора ударной волны параметры метания будут различаться и можно достичь скоростей компактных элементов выше 10 км/с.

Представленные схемы метания обладают своими преимуществами и недостатками. Устройства, формирующие КЭ из кумулятивной облицовки, значительно более эффективны (для получения сравнимых массово-скоростных параметров КЭ применяется заряд ВВ меньшей массы) и при приемлемой массе ВВ заряда могут формировать более крупные ударники. Устройства, формирующие КЭ при схлопывании полости в металлическом образце, позволяют получать более высокие скорости метания, а также изменять массово-скоростные параметры элементов при несложной доработке механической части устройств (без изменения заряда ВВ).

Применение представленных схем взрывного метания компактных элементов позволит существенно расширить скоростной диапазон исследования поведения преград, в том числе защитных экранов космических аппаратов, при воздействии высокоскоростных металлических ударников и частиц космического мусора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейбл А. Ускорители для метания со сверхзвуковыми скоростями // *Высокоскоростные ударные явления*. — М.: Мир, 1973.
2. Леконт К. Высокоскоростное метание // *Физика быстротекущих процессов*. — М.: Мир, 1971. — Т. 2.
3. Титов В. М., Швецов Г. А. Лабораторные методы высокоскоростного метания твердых тел взрывом // *Физика горения и взрыва*. — 1970. — Т. 6, № 3. — С. 401–404.
4. Мерзиевский Л. А., Титов В. М., Фадеев Ю. И., Швецов Г. А. Высокоскоростное метание твердых тел // *Физика горения и взрыва*. — 1987. — Т. 23, № 5. — С. 77–91.
5. Три направления разработки электромагнитных пушек в США // *Техника и вооружение сухопутных войск капиталистических государств*. — 1988. — Вып. 1(97).
6. Анисимов А. Г., Башкатов Ю. Л., Швецов Г. А. Взрывомагнитные генераторы для питания рельсотронных ускорителей твердых тел // *Физика горения и взрыва*. — 1986. — Т. 22, № 4. — С. 76–88.
7. Hornemann U., Holzwarth A. Characteristics of shaped charges with hemispherical liners // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 1993. — V. 18, N 5. — P. 282–287.
8. Балеевский А. Г., Киселев Ю. Г., Могилов В. А. и др. Высокоскоростное метание компактных элементов // *Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: сб. докл.* — Саров: ВНИИЭФ, 2000.
9. Жданов И. В., Князев А. С., Маляров Д. В. Получение высокоскоростных компактных элементов требуемых масс при пропорциональном изменении размеров кумулятивных устройств // *Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: сб. докл.* — Саров: ВНИИЭФ, 2012.
10. Пат. РФ № 2549505. Комбинированная кумулятивная облицовка для формирования высокоскоростных компактных элементов / Ладов С. В., Федоров С. В., Баянова Я. М. — Опубл. 27.04.2015.
11. 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.
12. Федоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М., Баскаков В. Д., Бабулин М. А., Курепин А. Е., Горбунков А. А., Пирозерский А. С. Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой типа полусфера — цилиндр дегрессивной толщины // *Физика горения и взрыва*. — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 122–125.
13. Колпаков В. И., Ладов С. В., Никольская Я. М., Федоров С. В. Анализ влияния

- физико-механических характеристик материала кумулятивной облицовки на параметры высокоскоростного элемента // Журн. техн. физики. — 2018. — Т. 88, № 12. — С. 1829–1836.
14. **Пат.** РФ № 2309367. Способ и устройство формирования компактного элемента / Князев А. С., Маляров Д. В. — Оpubл. 27.10.2007. Бюл. № 30.
15. **Пат.** РФ № 2525330. Устройство для формирования компактного элемента / Жданов И. В., Маляров Д. В., Князев А. С. — Оpubл. 10.08.2014. Бюл. № 22.
16. **Забабахин Е. И., Забабахин И. Е.** Явления неограниченной кумуляции. — М.: Наука, 1988.
17. **Пат.** РФ № 2553611. Способ формирования металлического компактного элемента / Князев А. С., Маляров Д. В. — Оpubл. 20.06.2015. Бюл. № 17.
18. **Leyrat J. P., Charvet E., Pujols H. C.** Creation and simulation of very fast jets // Int. J. Impact Eng. — 1993. — V. 14, N 1-4. — P. 467–477.
19. **Held M.** Diagnostic of superfast jets with 25 km/s tip velocities // Propell., Explos., Pyrotech. — 1998. — V. 23, N 5. — P. 229–236.
20. **Голденко Н. А., Грязнов Е. Ф., Судомов А. Д., Фельдштейн В. А.** Исследование влияния конструктивных параметров взрывного метательного устройства на скорость и характер метаемого элемента // Космонавтика и ракетостроение. — 2016. — № 7(92). — С. 42–47.
21. **Пат.** РФ № 73727. Устройство формирования компактного элемента / Князев А. С., Маляров Д. В. — Оpubл. 27.05.2008. Бюл. № 15.
22. **Пат.** РФ № 2378606. Кумулятивное метательное устройство / Князев А. С., Маляров Д. В. — Оpubл. 10.01.2010. Бюл. № 15.
23. **Пат.** РФ № 2383849 на изобретение «Кумулятивное устройство». — Оpubл. 10.03.2010. Бюл. № 7.
24. **Герасимов С. И., Захаров Д. В., Зубанков А. В. и др.** Рентгенорегистрация на испытательных стендах // Науч. визуализация. — 2018. — Т. 10, № 2. — С. 112–137.

Поступила в редакцию 29.07.2019.

После доработки 09.09.2019.

Принята к публикации 24.12.2019.