

## Численное моделирование формирования и метания элементов из тяжелого сплава в малокалиберном выстреле ближнего боя

© И.В. Завора<sup>1,2</sup>, Н.А. Имховик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НПО «Прибор», Москва, 117519, Россия  
<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Изложены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований процесса взрыва осколочной гранаты малокалиберного выстрела для перспективного автоматического гранатомета. Предложена усовершенствованная конструкция осколочной оболочки выстрела калибра 40 мм, включающая в себя кольцевые блоки поражающих элементов заданного дробления из тяжелого сплава на основе вольфрама. Представлена методика автоматизированного параметрического построения расчетных сеток элементов малокалиберного выстрела. Рассмотрены основные стадии процесса формирования и метания поражающих элементов заданного дробления из колец с равномерно нанесенными насечками. Выявлено образование спектра сдвиговых сопутствующих осколков треугольной формы в местах нанесения насечек. Приведены результаты стационарных подрывов макетов осколочных выстрелов калибра 40 мм с набором колец, изготовленных методом инъекционного формования из порошкового материала. Выполнена статистическая обработка массогабаритных характеристик полученного осколочного спектра и определена средняя скорость метания полуготовых поражающих элементов. Показана сходимость проведенного численного расчета с результатами экспериментальных исследований по массово-числовым, геометрическим и скоростным характеристикам полуготовых поражающих элементов и сопутствующего осколочного спектра.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, малокалиберный выстрел, осколочная оболочка, расчетная сетка, взрывное метание, фрагментация, осколочный спектр, поражающие элементы

**Введение.** Станковые автоматические гранатометы, зарекомендовавшие себя надежным и эффективным оружием огневой поддержки пехоты, состоят на вооружении многих армий мира [1, 2]. К отечественным гранатометным комплексам относятся станковые гранатометы АГС-17 и АГС-30 калибра 30 мм [2, 3], а также недавно разработанный АО «НПО «Прибор» автоматический противопехотный гранатометный комплекс повышенного могущества 6Г27 «Балкан» калибра 40 мм [3, 4] с увеличенной дальностью стрельбы (до 2,5 км) и повышенной эффективностью поражения типовых целей (до 2 раз) по сравнению с гранатометами калибра 30 мм.

Дальнейшее повышение огневых возможностей автоматических гранатометов и расширение круга задач, решаемых с их применением, специалисты видят в первую очередь в разработке и принятии на

вооружение новых более эффективных и недорогих при серийном производстве боеприпасов (БП) — осколочных гранат, являющихся составной частью типовых противопехотных гранатометных выстрелов [1–4].

В отечественных осколочных гранатах калибров 30 и 40 мм основным элементом БП, обеспечивающим его осколочное поражающее действие, является стальной корпус, представляющий собой штампованную деталь с нанесенными на ее цилиндрическую часть насечками или канавками небольшой глубины. При детонации разрывного заряда бризантного взрывчатого вещества (ВВ) в таком корпусе реализуется схема близкого к естественному «регулируемого» дробления. Вследствие зависимости характера данного процесса от многих факторов возможно образование неоптимальных поражающих элементов (осколков) с широким диапазоном разброса их массы, формы и скорости разлета. Выходные массово-числовые характеристики осколочного спектра гранаты являются вероятностными, что затрудняет прогнозирование эффективности гранатометных выстрелов в различных условиях их применения, в частности при поражении живой силы, оснащенной современными средствами индивидуальной бронезащиты [5]. Для большинства разработанных ранее (20–30 лет тому назад и более) гранатометных выстрелов калибров 30 и 40 мм (как отечественных, так и зарубежных) все более широкое использование средств индивидуальной бронезащиты, а также легкобронированной военной техники, делает применение штатных противопехотных осколочных гранат (в особенности калибра 30 мм) малоэффективным и не удовлетворяющим ни современным, ни тем более перспективным требованиям к средствам ближнего боя.

Как известно [1], существенное повышение могущества и эффективности действия осколочных БП по широкому спектру целей может быть достигнуто в результате применения в БП готовых или полуготовых поражающих элементов, в особенности если они выполнены из тяжелого сплава. Конструкция одного из вариантов подобного типа БП — осколочной гранаты калибра 40 мм с готовыми поражающими элементами в виде шариков диаметром 2,5...3,5 мм из сплава ВНЖ-90, располагаемых между двумя коаксиальными алюминиевыми оболочками и заливаемых полиэтиленом, предложена в патенте [6]. Предполагалось, что шарообразные поражающие элементы из тяжелого сплава в процессе их ударно-волнового нагружения и метания продуктами детонации будут разгоняться инерционно и практически не деформируясь сохранять оптимальную для аэродинамики сферическую форму и высокую пробивную способность.

3D-численное компьютерное моделирование процесса взрыва осколочной гранаты данного типа, выполненное в работах [7, 8] (до начала стадии экспериментальной отработки БП), позволило не толь-

ко рассчитать динамику разгона комбинированной осколочной оболочки, но и получить распределения масс и скоростей как собственно готовых поражающих элементов из ВНЖ-90, так и алюминиевых фрагментов корпуса гранаты по меридиональному углу разлета. В работе [9] дополнительно рассмотрено влияние на распределение скоростей и относительных масс готовых поражающих элементов переноса точки инициирования в центр разрывного заряда.

Анализ полученных в [7–9] распределений показал, что для трех рассмотренных вариантов снаряжения (взрывчатых составов) около 80 % готовых поражающих элементов разлетались в меридиональном угле 85...100°; при этом средняя скорость (м/с) их блока составила:

А-3 (аналог отечественного состава А-IX-1) .....	652
PBX-9404 (аналог состава окфол-3,5) .....	735
РАХ-29 (на основе СL-20; отечественные аналоги отсутствуют) .....	833

Максимальная скорость отдельных готовых поражающих элементов из тяжелого сплава в расчетах [7–9] не превысила 900...1000 м/с (скорость алюминиевых фрагментов корпуса достигала 1500 м/с и более). Это обусловлено преждевременным прорывом продуктов детонации в зазоры между метаемыми готовыми поражающими элементами, приводящим к снижению темпа разгона тяжелосплавных готовых поражающих элементов и их фактических скоростей метания в конце периода разгона (по сравнению с ожидаемыми по предварительным оценкам [6] и фактическим скоростям метания в случае цельнокорпусных стальных оболочек такой же массы [3, 4]).

Для устранения преждевременного прорыва продуктов детонации и получения более высоких скоростей метания тяжелосплавных поражающих элементов, а также в целях более рационального использования ресурса массы осколочной оболочки (повышения ее несущей способности и обеспечения прочности гранаты при выстреле) в настоящей работе предлагается вместо залитого полиэтиленом слоя готовых поражающих элементов сферической формы использовать полуготовые элементы, которые формируются из плотно прилегающих одно к другому колец с равномерно нанесенными насечками.

Рассмотрим усовершенствованную конструкцию выстрела калибра 40 мм [6], предназначенного для перспективного автоматического гранатомета «Балкан» [4] (рис. 1).

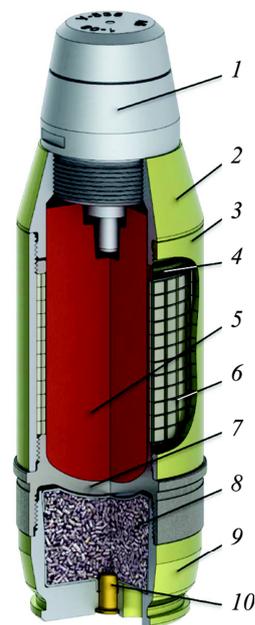


Рис. 1. Устройство выстрела

**Схема модернизированной конструкции выстрела.** Выстрел состоит из головного контактного взрывателя 1, боевой части и метательного заряда. Боевая часть выстрела состоит из набора колец 6, размещенных в цилиндрической внешней оболочке 3 с привинчивающейся донной частью 7, шашки 5 разрывного заряда ВВ, а также переходной втулки 2. Набор колец фиксируется в трубке с помощью резьбового стопорного кольца 4. Стальное сферическое дно выполняет силовую функцию и служит для соединения элементов выстрела. Метательный заряд включает в себя втулку 9 с установленным капсюлем-воспламенителем 10 и размещенной внутри навеской 8 пироксилинового пороха.

На внешней поверхности каждого кольца равномерно нанесены насечки, позволяющие формировать поражающие элементы заданного дробления. Кольца изготавливают из тяжелого сплава на основе вольфрама методом инъекционного формования из порошкового материала (МІМ-технология) [10].

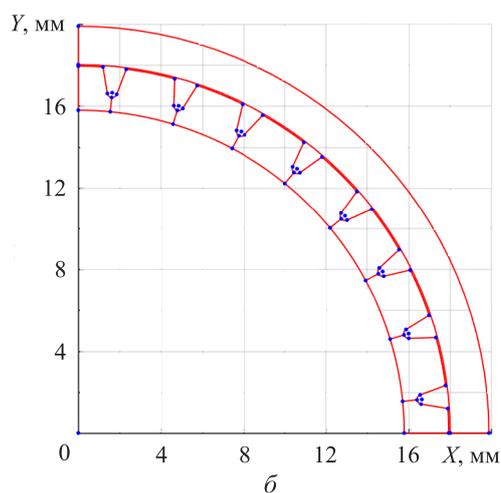
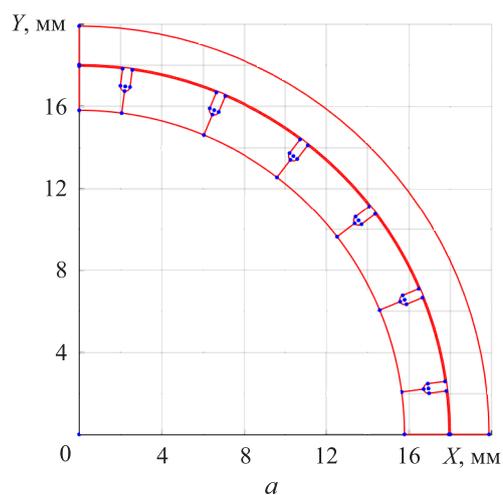
Отметим появление ранее не применявшихся в боеприпасной отрасли прогрессивных и экономически эффективных технологий инъекционного формования, которые позволяют производить изделия из порошковых материалов, в том числе тяжелых сплавов. Преимущества такой технологии заключаются в предположительно точном повторении геометрии детали, высокой точности размеров и прочности, а также возможности изготовления массовых объемов деталей при их довольно низкой себестоимости.

**Постановка задачи численного моделирования.** В целях изучения особенностей процесса формирования и метания полуготовых поражающих элементов, образующихся из набора колец заданного дробления, в настоящей работе с использованием численных методов механики сплошной среды [11] рассматривается задача о деформировании и фрагментации тяжелосплавных колец сложной формы, окруженных внешней оболочкой осколочных гранат, в перпендикулярном их оси сечении. Задача решается методом Лагранжа — Эйлера [11, 12] в двухмерной постановке с помощью программного комплекса AUTODYN [13]. При моделировании используются лагранжевы сетки для задания областей тяжелосплавных колец (с равномерно нанесенными на их внешнюю и/или внутреннюю поверхность насечками различной формы и глубины) и внешней оболочки осколочных гранат, а также эйлерова сетка для задания области разлета поражающих элементов, в том числе области разлета продуктов детонации заряда ВВ. Для сокращения времени расчета, а также учитывая плоскостную симметрию конструкции «осколочной рубашки» осколочной гранаты, рассматривается только четверть пространства.

Между лагранжевыми сетками элементов конструкции осколочных гранат и эйлеровой сеткой окружающего пространства задается

контакт. Узлы лагранжевых сеток соседних элементов кольца соединены между собой.

Эйлерова сетка представляет собой прямоугольную область  $60 \times 60$  мм, соответствующую трем радиусам сечения оболочки осколочной гранаты. На внешней границе области задано граничное условие выхода материала. Расчетная область, окружающая осколочную гранату, считается заполненной воздухом.



**Рис. 2.** Контуры элементов выстрела (осколочной гранаты):  
*a* — кольцо с 24 насечками (относительная глубина 50 %); *b* — кольцо с 32 насечками (глубина 66 % и угол  $30^\circ$ )

Ввиду многовариантности возможного конструктивного исполнения «осколочной рубашки» и других элементов гранаты (на данном этапе уже рассмотрено в общей сложности более 10 вариантов геометрии и материалов), актуальной задачей являлась разработка методики автоматизированного построения лагранжевых сеток для блока колец заданного дробления, имеющего сложную форму (см. рис. 2), и для окружающей блок внешней оболочки — в зависимости от параметров конструкции осколочной гранаты и набора материалов.

Для реализации параметрического построения сетки на основе объектно-ориентированного подхода была разработана программа, выполняемая в среде MATLAB [14]. Программа предназначена для автоматического построения регулярных сеток для замкнутых контуров произвольной формы в целях последующего экспорта в AUTODYN. В программе предусмотрены классы для параметрического построения контуров различных геометрических объектов.

Для описания геометрии рассматриваемой задачи были заданы следующие параметры: внешний и внутренний диаметры оболочки и кольца, количество поражающих элементов заданного дробления в кольце, а также диаметр, угол и радиус вершин насечек (см. рис. 2).

В случае нахождения поражающего элемента на оси координат необходимо выполнить построение его половинки, при этом общее число поражающих элементов должно быть кратно 4.

Для всех замкнутых областей были построены адаптивные сетки, в которых координаты внутренних узлов определялись по решению эллиптических уравнений согласно описанному методу [15]. Внешние узлы, являющиеся граничными условиями для построения внутренних, равномерно распределялись по контурам замкнутых областей. Средний размер ячейки сетки также являлся задаваемым параметром, в зависимости от которого рассчитывалось количество ячеек для всех элементов конструкции выстрела (рис. 3).

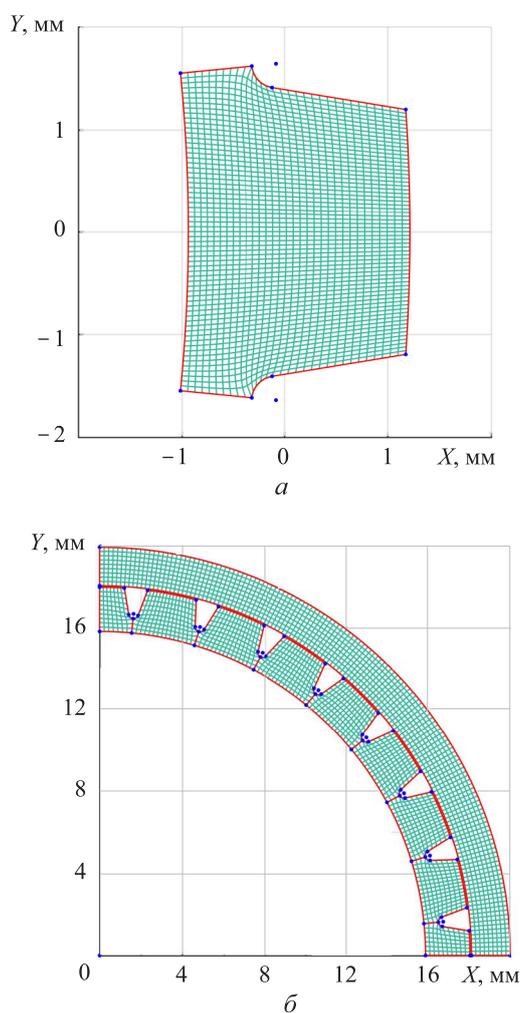
При моделировании предполагалось, что внешняя оболочка (см. рис. 3, б) выполнена из алюминиевого сплава марки 2024-T351 (аналог Д16Т), а кольцо — из тяжелого сплава 90W-7Ni-3Fe (аналог Н7Ж3А).

Уравнения состояния материалов заданы в форме ударной адиабаты ( $D = a + \lambda u$ ) с соответствующими коэффициентами (табл. 1) по [16, 17].

Таблица 1

Параметры уравнений состояния

Материал	Параметр		
	$\rho_0, \text{г/см}^3$	$a, \text{м/с}$	$\lambda$
2024-T351	2,784	5370	1,29
90W-7Ni-3Fe	17,068	3744	1,522



**Рис. 3.** Расчетная сетка для варианта исполнения осколочной гранаты с 32 насечками на кольце с относительной глубиной 66 %:  
*a* — сегмент кольца; *б* — кольцо и внешняя оболочка

Упругопластические свойства материалов описаны моделью Джонсона — Кука с коэффициентами (табл. 2) по [18]. Критерием разрушения материалов является достижение пластической деформации заданного уровня в 50 %.

Таблица 2

Параметры модели Джонсона — Кука

Материал	Параметр							
	$G$ , ГПа	$A$ , МПа	$B$ , МПа	$n$	$C$	$m$	$T_m$ , К	$T_r$ , К
2024-T351	27,6	265	426	0,34	0,015	1,00	775	300
90W-7Ni-3Fe	145	1506	177	0,12	0,016	1,00	1723	300

Как и в работах [7–9], в качестве снаряжения осколочной гранаты рассмотрен традиционный для осколочных противопехотных гранат взрывчатый состав А-3 — аналог отечественного состава А-IX-1 (флегматизированный гексоген) [1, 17].

Применены следующие коэффициенты уравнения состояния продуктов детонации в форме JWЛ, заимствованные из работы [17], и основные детонационные характеристики состава А-3:

Плотность $\rho_0$ , г/см <sup>3</sup> .....	1,65
Скорость детонации $D$ , км/с .....	8,30
Коэффициенты уравнения состояния:	
$E_0$ , ГПа .....	8,89
$A$ , ГПа .....	611,3
$B$ , ГПа .....	10,65
$C$ , ГПа .....	1,08
$R_1$ .....	4,40
$R_2$ .....	1,20
$\omega$ .....	0,32

Инициирование детонации разрывного заряда ВВ осколочной гранаты осуществлялось из точки, расположенной на оси выстрела (на уровне детонатора взрывателя 1, см. рис. 1), до физического времени  $t = 30$  мкс.

Исходные геометрические и массовые характеристики полуготовых поражающих элементов в кольце (номинальные, закладываемые в расчет, и фактические, с учетом погрешностей изготовления) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные характеристики поражающих элементов (в кольце)

Характеристика	Значение	
	в расчете	фактическое
Толщина, мм	2,15	2,15±0,2
Ширина, мм	2,95	2,95±0,05
Масса, г	0,305	0,305±0,035

**Основные стадии фрагментации.** Процесс фрагментации кольца можно разделить на три основные стадии: сжатия, разрушения и разлета не взаимодействующих поражающих элементов. Стадия сжатия начинается с момента начала воздействия продуктов детонации на внутреннюю 1 поверхность кольца и завершается схлопыванием насечек на его внешней 2 поверхности (рис. 4).

Зависимость толщины кольца от времени (рис. 5) определена по координатам двух датчиков, расположенных на его внутренней 1 и внешней 2 поверхностях (рис. 6).

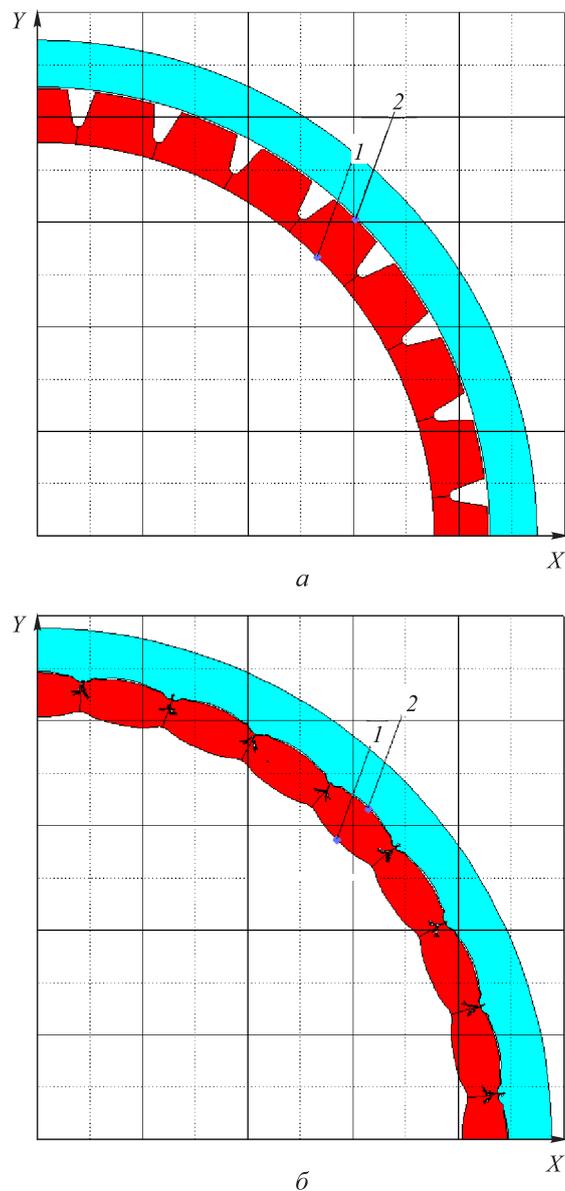


Рис. 4. Формы кольца осколочной гранаты на стадии сжатия в начальный (а),

$$\frac{R}{R_0} = 1, \text{ и конечный (б), } \frac{R}{R_0} = 1,15, \text{ моменты}$$

Длительность стадии сжатия составляет  $\approx 5$  мкс. После завершения сжатия толщина кольца изменяется незначительно. На пластическую деформацию кольца на стадии сжатия затрачивается  $\approx 3\%$  начальной энергии заряда ВВ.

Стадия разрушения кольца начинается по окончании сжатия и завершается разделением кольца на основные и сопутствующие оскол-

ки [1, 17]. Характерно образование спектра сдвиговых сопутствующих осколков треугольной формы в местах нанесения насечки (см. рис. 6). Моменту окончания разрушения кольца отвечает прекращение изменения энергии пластической деформации его материала, что соответствует относительному радиусу  $\frac{R}{R_0} = 1,3$  и времени  $t \approx 10$  мкс.

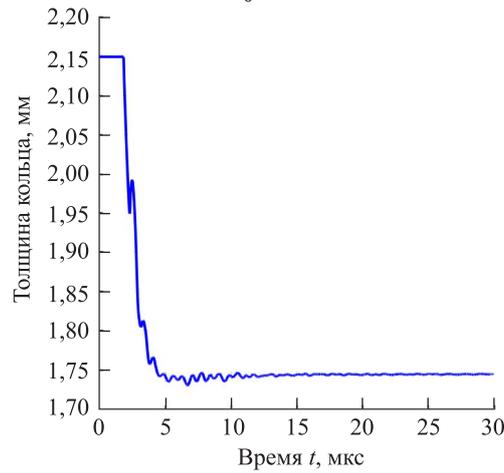


Рис. 5. Зависимость толщины кольца от времени

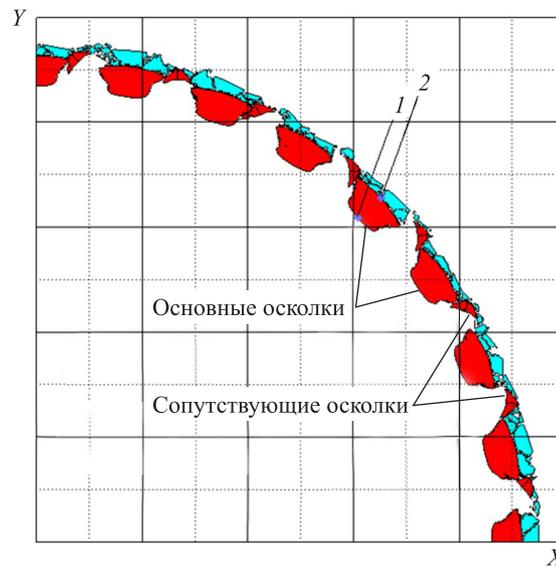


Рис. 6. Основные и сопутствующие осколки при  $t = 12$  мкс

Стадия свободного разлета фрагментов начинается после разделения кольца и примыкающей к нему внешней оболочки гранаты на отдельные фрагменты. По истечении времени  $t = 12...15$  мкс набор

скорости поражающими элементами из тяжелого сплава существенно замедляется (рис. 7). Максимальная скорость сформировавшихся элементов достигнута при  $t = 30$  мкс и составляет  $\approx 1483$  м/с.

рис 5

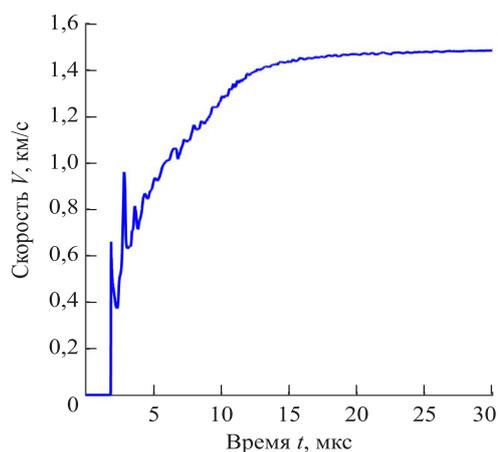


Рис. 7. Зависимость скорости основного осколка (поражающего элемента) от времени

**Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.** На рис. 8 приведены фотографии реальных поражающих элементов, полученных при стационарном подрыве макетов осколочных гранат калибра 40 мм с набором колец заданного дробления (см. табл. 3).



Рис. 8. Элементы заданного дробления, собранные после подрыва: а — внешний вид; б — вид сбоку; в — вид с внутренней поверхности кольца

Для сравнения в табл. 4 приведены геометрические характеристики окончательно сформировавшихся поражающих элементов, полученные при численном расчете, и их скорости метания, а также экспериментальные данные. Эксперимент включал в себя три стационарных подрыва в бронекамере с улавливающей средой — опилками. После каждого подрыва элементы выбирались из опилок, далее осуществлялась случайная выборка в объеме 50 шт. с их последующим обмером и взвешиванием (в соответствии с действующими отраслевыми методиками).

Отметим, что форма поражающих элементов, извлеченных из уловителя после подрыва (см. рис. 8), качественно соответствует форме, получившейся при численном расчете. В обоих случаях на боковых поверхностях элементов присутствуют скосы с углом  $\approx 45^\circ$ , получающиеся вследствие образования сдвиговых сопутствующих осколков, а также выпуклые нижние части, которые соответствуют внутренней поверхности кольца.

Таблица 4

#### Характеристики поражающих элементов после подрыва

Характеристика	Значение	
	расчет	эксперимент
Длина, мм	3,75	3,84±0,54
Толщина, мм	1,80	1,82±0,17
Ширина, мм	2,95	2,96±0,27
Масса, г	0,253	0,278±0,026
Площадь миделя $\langle S \rangle$ , мм <sup>2</sup>	11,56	11,88
Коэффициент формы $\Phi$	1,571	1,575
Начальная скорость, м/с	1483	1396...1537

По геометрическим характеристикам поражающих элементов после подрыва определены площадь миделя  $\langle S \rangle$  и коэффициент формы осколка  $\Phi$  [1, 17]. Данные параметры, а также начальная скорость и угол разлета поражающих элементов важны для последующих оценок показателей эффективности действия БП по типовым целям [1–3] (и выбора по ним оптимальной начальной формы блока фрагментирующихся колец и других элементов выстрела).

Средняя начальная скорость метания поражающих элементов определена по двум дополнительным опытам с подрывом осколочной гранаты в щитовой мишенной обстановке, адаптированной к испытаниям малокалиберных выстрелов. Среднее значение скорости метания поражающих элементов, полученное в первом опыте (по 19 элементам, попавшим в расположенную на расстоянии 2 м улавливающую мишень и пробившим ее), составило 1537 м/с, во вто-

ром — 1396 м/с (по 25 элементам и меридиональном угле их разлета несколько больше такого угла в первом опыте). Значение скорости метания элементов, полученное численным расчетом (для колец, расположенных в экваториальной плоскости осколочной гранаты), составило  $\approx 1483$  м/с (см. рис. 7), т. е. оказалось в пределах экспериментального интервала начальных скоростей поражающих элементов.

**Заключение.** Выполнено численное математическое моделирование и изучены особенности процесса формирования и метания полуготовых поражающих элементов из тяжелого сплава, образующихся из набора колец заданного дробления. Показана сходимость результатов численного расчета с результатами проведенных экспериментальных исследований по массово-числовым, геометрическим и скоростным характеристикам полуготовых поражающих элементов и сопутствующего осколочного спектра. Продемонстрирована возможность применения разработанного алгоритма и программы автоматического построения регулярных сеток для замкнутых контуров произвольной формы при решении (в комплексе с пакетом программ AUTODYN) таких сложных и актуальных прикладных задач механики твердого деформируемого тела, как прогнозирование массы, формы и начальной скорости поражающих элементов, формируемых из осколочных оболочек заданного дробления. Знание данных характеристик необходимо специалистам-боеприпасникам для проведения сравнительных оценок эффективности действия штатных и вновь создаваемых БП и/или системной оптимизации элементов конструкции вновь проектируемых осколочных гранат исходя из требуемых показателей по их эффективности и могуществу действия [1–4], а также специалистам по разработке средств локального и индивидуального бронирования для проведения соответствующих оценок действия тяжелосплавных поражающих элементов перспективных осколочных БП по вновь разрабатываемым материалам и структурам легкой бронезащиты [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др. *Боеприпасы. В 2 т. Т. 1.* В.В. Селиванов, ред. 3-е изд., испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [2] Зеленко В.К., Брызжев А.В., Злобин В.В., Королев В.М. *Пистолетные и снайперские патроны. Гранатометные выстрелы.* Тула, Инфра, 2008, 120 с.
- [3] Чижевский О.Т., Косихин А.И. Гранатометы и выстрелы ОАО «НПО «Прибор». *Арсенал Отечества*, 2015, № 2 (16). URL: <http://arsenal-otechestva.ru/article/445-pribor> (дата обращения 24.12.2017).
- [4] *40-мм гранатометный противопехотный комплекс 6Г27 «Балкан».* АО «НПО «Прибор». URL: <http://www.militarypribor.ru/ru/products/grl> (дата обращения 24.12.2017).
- [5] Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В. *Материалы и структуры легкой бронезащиты.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 191 с.

- [6] Завора И.В., Косихин А.И., Николаев С.Е., Чижевский О.Т. *Артиллерийский патрон*. Пат. № 2421685 Российская Федерация, 2011, бюл. № 17.
- [7] Завора И.В., Имховик Н.А. Численное моделирование особенностей метания осколочной оболочки, содержащей готовые поражающие элементы из тяжелого сплава. *Труды XXII Всероссийской научно-технической конференции «Передача, прием, обработка и отображение информации о быстропротекающих процессах»*. Москва, Изд-во РПА «АПР», 2011, с. 235–240.
- [8] Завора И.В., Имховик Н.А., Соловьев В.С. Численное моделирование метания готовых поражающих элементов 40-мм осколочных гранат, снаряженных ВВ различного типа. *Оборонная техника*, 2011, № 2–3, с. 20–24.
- [9] Имховик Н.А., Завора И.В. Численное моделирование особенностей влияния свойств ВВ и положения точки инициирования разрывного заряда на процесс метания осколочной оболочки, содержащей блок ГПЭ из тяжелого сплава. *Сб. докл. VII науч. конф. ВРЦ РАРАН, г. Саров, 1–3 июня 2011 г.* Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011, с. 430–436.
- [10] Пархоменко А.В., Амосов А.П., Самборук А.Р. Научно-технологическая технология инжекционного порошкового формования металлических деталей (мимтехнология). *Научно-технологические технологии в машиностроении*, 2012, № 12, с. 8–13.
- [11] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Прикладная механика сплошных сред. В 3 т. Т. 3. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов*. В.В. Селиванов, ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
- [12] Rusinek A., Zaera R. Finite element simulation of steel ring fragmentation under radial expansion. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34, no. 4, p. 799–822.
- [13] *ANSYS Autodyn User's Manual*. ANSYS, Inc., Southpointe, 2013, 502 p.
- [14] Лазарев Ю.Ф. *Моделирование процессов и систем в MATLAB*. Санкт-Петербург, Питер, Издательская группа BHV, 2005, 512 с.
- [15] Winslow A.M. *Adaptive Mesh Zoning by the Equipotential Method*. UCID-19062. Livermore, Lawrence Livermore Nat. Lab., University of California, 1981.
- [16] Hauver G.E., The Hugoniot for 90W-7Ni-3Fe tungsten alloy. *Report ARBRL-MR-02987*. U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Maryland, 1980, 20 p.
- [17] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. *Физика взрыва. В 2 т. Т. 2*. Л.П. Орленко, ред. 3-е изд., испр. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [18] Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, 19–21 April 1983*, pp. 541–547.

Статья поступила в редакцию 30.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Завора И.В., Имховик Н.А. Численное моделирование формирования и метания элементов из тяжелого сплава в малокалиберном выстреле ближнего боя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 5.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-5-1767>

**Завора Илья Викторович** — аспирант кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заместитель начальника отдела автоматических гранатометных комплексов и выстрелов к ним АО «НПО «Прибор». Автор 12 опубликованных научных работ и изобретений в области малокалиберных боеприпасов, численного моделирования функционирования боеприпасов и детонации.  
e-mail: zavora@inbox.ru

**Имховик Николай Александрович** — доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук, чл.-кор. Российской академии естественных наук (РАЕН). Автор более 150 опубликованных научных работ и изобретений в области химической физики процессов горения и взрыва, теории энергетических материалов, численного моделирования детонации, теории проектирования и действия боеприпасов. e-mail: imkhovik-n@mail.ru

## Numerical simulation of formation and acceleration of high-density alloy fragments in a small-calibre short-range round

© I.V. Zavora<sup>1</sup>, N.A. Imkhovik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PJSC Scientific Production Association Pribor, Moscow, 117519, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article presents results of numerical simulation and experimental studies of the explosion process of a fragmentation grenade from a small-calibre round for a promising automatic grenade launcher. We propose an improved design of a fragmentation shell for a 40 mm round that features annular controlled fragmentation regions made of a tungsten-based high-density alloy. We show that automated parametric meshing of components of a small-calibre round is possible. The study deals with the basic stages of forming and accelerating controlled fragments out of uniformly notched rings. We detected a range of triangle-shaped associated fragments generated via shear deformation in the notching sites. We provide static explosion test results for mockups of 40 mm fragmentation rounds featuring a set of rings manufactured by means of powder injection moulding. Statistical processing of mass and size characteristics in the fragment distribution obtained led to determining average acceleration velocity of the controlled fragments. We show that our numerical simulation converges with experimental data in terms of mass, geometrical and velocity characteristics of controlled fragments and their corresponding fragment distribution.*

**Keywords:** numerical simulation, small-calibre round, fragmentation shell, computational mesh, explosive acceleration, fragmentation, fragment distribution, fragments

### REFERENCES

- [1] 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.
- [2] Zelenko V.K., Bryzhev A.V., Zlobin V.V., Korolev V.M. *Pistoletnye i snayperskie patrony. Granatometnye vystrely* [Handgun and sniper rifle cartridges. Grenade launcher rounds]. Tula, Infra Publ., 2008, 120 p.
- [3] Chizhevskiy O.T., Kosikhin A.I. *Arsenal Otechestva (Arsenal of the Fatherland)*, 2015, no. 2 (16). Available at: <http://arsenal-otechestva.ru/article/445-pribor> (accessed December 24th, 2017).
- [4] *40-mm granatometnyy protivopekhotnyy kompleks 6G27 Balkan. AO NPO Pribor* [40 mm antipersonnel grenade launcher 6G27 Balkan. PJSC Scientific Production Association Pribor]. Available at: <http://www.militarypribor.ru/ru/products/grl> (accessed December 24th, 2017).
- [5] Kobytkin I.F., Selivanov V.V. *Materialy i struktury legkoy bronezashchity* [Materials and structures of lightweight body armour]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 191 p.
- [6] Zavora I.V., Kosikhin A.I., Nikolaev S.E., Chizhevskiy O.T. *Artilleriyskiy patron* [Artillery round]. Patent RU2421685, 2011, bulletin no. 17.
- [7] Zavora I.V., Imkhovik N.A. Chislennoe modelirovanie osobennostey metaniya oskolochnoy obolochki, sodержashchey gotovye porazhayushchie elementy iz tyazhelogo splava [Numerical simulation of acceleration specifics of a fragmentation shell featuring pre-formed high-density fragments]. *Trudy XXII Vse-*

- rossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii Peredacha, priem, obrabotka i otobrazhenie informatsii o bystroprotekayushchikh protsessakh* [Proc. of the 22nd Scientific and Technological conference Transmission, reception, processing and visualisation of data on high-speed processing]. Moscow, APR Advertising and Industrial Agency Publ., 2011, pp. 235–240.
- [8] Zavora I.V., Imkhovik N.A., Solovov V.S. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2011, no. 2-3, pp. 20–24.
- [9] Imkhovik N.A., Zavora I.V. Chislennoe modelirovanie osobennostey vliyaniya svoystv VV i polozheniya tochki initsirovaniya razryvnogo zaryada na protsess metaniya oskolochnoy obolochki, sodержashchey blok GPE iz tyazhelogo splava [Numerical simulation of the specific ways that properties of the explosive material and the location of the point where the bursting charge is initiated affect acceleration of a shell comprising a pre-fragmented high-density alloy region]. *Sb. dokl. VII Nauchnoy konferentsii Volzhskogo regionalnogo tsentra, g. Sarov, 13 iyunya 2011 g. RARAN* [Proc. of the 7th Scientific Conference of the Volga Regional Center, Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, Sarov, June 1st-3rd 2011]. Sarov, Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute Of Experimental Physics Publ., 2011, pp. 430–436.
- [10] Parkhomenko A.V., Amosov A.P., Samboruk A.R. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii — Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2012, no. 12, pp. 8–13.
- [11] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Prikladnaya mekhanika sploshnykh sred* [Applied continuum mechanics]. In 3 vols. Vol. 3: *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov* [Numerical methods in problems of physics of high-speed processes]. Selivanov V.V., ed. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2006, 520 p.
- [12] Rusinek A., Zaera R. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, vol. 34, no. 4, p. 799–822.
- [13] *ANSYS Autodyn User's Manual*. ANSYS, Inc., Southpointe, 2013, 502 p.
- [14] Lazarev Yu.F. *Modelirovanie protsessov i sistem v MATLAB* [Simulating processes and systems in MATLAB]. Saint Petersburg, Piter Publ., BHV Publ., 2005, 512 p.
- [15] Winslow A.M. *Adaptive Mesh Zoning by the Equipotential Method*. UCID-19062. Livermore, Lawrence Livermore Nat. Lab., University of California, 1981.
- [16] Hauver G.E. *The Hugoniot for 90W-7Ni-3Fe tungsten alloy: Report ARBRL-MR-02987*. U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Maryland, 1980, 20 p.
- [17] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A. et al. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. In 2 vols. Vol. 2. Orlenko L.P., ed. 3rd ed., revised. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004, 656 p.
- [18] Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. The Hague, 19–21 April 1983, pp. 541–547.

**Zavora I.V.**, Deputy Head of Department of Automatic Grenade Launchers and Rounds, PJSC Scientific Production Association Pribor; post-graduate student, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of 12 scientific publications and inventions in the field of small-calibre munitions, numerical simulation of munition functioning and detonation. e-mail: zavora@inbox.ru

**Imkhovik N.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University, Corresponding Member, Russian Academy of Natural Sciences. Author of over 150 scientific publications and inventions in the field of chemical physics of combustion and explosion, theory of energetic materials, numerical simulation of detonation, theory of munition design and effect.  
e-mail: imkhovik-n@mail.ru