

Анализ осколочно-дробящих свойств новых взрывчатых составов с использованием стандартного осколочного цилиндра RSFC № 12

© А.В. Бармин¹, Ю.Г. Печенев¹, В.А. Одинцов²,
Н.А. Имховик², И.П. Мачнева²

¹АО «ГосНИИ «Кристалл», Дзержинск, Нижегородская обл., 606007, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Выполнен анализ результатов статистической обработки осколочных масс, полученных при испытаниях стандартных осколочных цилиндров (СОЦ, или RSFC — Russian Standard Fragmenting Cylinder) закрытого типа № 12, снаряженных тремя типами штатных взрывчатых веществ, четырьмя новыми литьевыми и четырьмя новыми холодно-прессовыми взрывчатыми составами, разработанными в АО «ГосНИИ «Кристалл». Корпуса осколочных макетов изготовлены точением и штамповкой из сталей С-60 и 80Г2С. На примере комбинаций С-60 — ГАСС-8 и С-60 — ГАСС-12 рассмотрены особенности статистической обработки осколочных масс RSFC № 12 по новому способу обработки осколочного спектра — способу Одинцова (патент № 2362968 РФ). Проанализированы корреляционные зависимости двух основных массово-числовых характеристик ($N_{0,25}$, μ_c) осколочных спектров RSFC № 12, изготовленных штамповкой из нормализованной снарядной стали С-60 и эвтектоидной стали 80Г2С, от свойств взрывчатых составов: скорости детонации, давления Чепмена — Жуге и скорости расширения оболочки W_{15} — по методике Т-20. Установлена высокая теснота связей W_{15} — $N_{0,25}$ и W_{15} — μ_c (коэффициент корреляции $r \geq 0,94$), что свидетельствует о существовании приближающейся к функциональной зависимости между метательной способностью и дробящим действием взрывчатых составов.

Ключевые слова: стандартный осколочный цилиндр, взрывное разрушение, осколочный спектр, взрывчатые составы, детонационные характеристики, метательная способность, корреляционные зависимости

Введение. Как известно, основными способами повышения мощности действия осколочных и осколочно-фугасных боеприпасов (БП) общего назначения являются [1–3] следующие:

- использование новых, более мощных взрывчатых веществ (ВВ) и взрывчатых составов (ВС);
- увеличение коэффициента наполнения БП (в том числе в результате повышения начальной плотности разрывного заряда ВВ);
- применение новых высокоосколочных марок стали (что особенно актуально для осколочных и осколочно-фугасных БП с корпусами естественного дробления);

• совместная оптимизация свойств «металл — ВВ» (выбор оптимальных комбинаций материала корпуса (снарядной стали) и взрывчатого вещества).

Для предварительного отбора перспективных высокоосколочных марок стали, поиска оптимальных комбинаций «металл — ВВ», установления общих физических закономерностей взрывного разрушения металлических оболочек, снаряженных бризантными ВВ, особый интерес представляют исследования, выполненные с использованием стандартного осколочного цилиндра (СОЦ), или Russian Standard Fragmenting Cylinder (RSFC) [4–6], а также его зарубежных аналогов [7, 8]. Испытания в отечественных СОЦ с корпусами закрытого типа (в частности, СОЦ № 12) — в настоящее время наиболее обоснованный и доступный экспериментальный способ изучения характеристик спектра разрушения металлических цилиндров и сравнительной оценки осколочно-дробящих свойств штатных ВВ и новых мощных взрывчатых композиций, предназначенных для снаряжения перспективных осколочных и осколочно-фугасных БП с корпусами естественного дробления [1, 3–6].

В соответствии с ГОСТ В 25430–82 осколочный цилиндр № 12 и его модификации использовались в исследованиях организациями различных министерств и ведомств. С помощью RSFC № 12 найдены новые высокоосколочные стали, в том числе кремнистая сталь марки 60С2 (патенты № 2079099 РФ, № 2095740 РФ), эвтектоидная сталь 80Г2С (патент № 2153024 РФ) и 80С2 (сталь Одинцова — Ботвиной, патент № 2368691 РФ). Сталь 80Г2С, разработанная совместно с Т.Ф. Волиновой, внедрена в производство 100-мм осколочно-фугасных снарядов к пушке 2А70 боевой машины пехоты БМП-3. По данным испытаний цилиндров RSFC № 12 найдены и запатентованы два новых состава ВВ (патенты № 2326335 РФ, № 2363915 РФ), а также разработан новый способ статистической обработки осколочной массы (способ Одинцова, патент № 2362968 РФ), включающий измерение массы и длины каждого осколка.

Исходя из данных экспериментальных исследований и представлений о бимодальной (двухкомпонентной) природе осколочного спектра [4, 5], В.А. Одинцов предложил новую статистическую модель спектра — гиперэкспоненциальное трехпараметрическое распределение [9].

Сравнительные исследования метательно-дробящего действия 10 индивидуальных и смесевых ВВ в унифицированных осколочных цилиндрах, изготовленных методом точения из нормализованной снарядной стали С-60, выполнены в работах [10, 11]. Аналогичные исследования [12] проведены для СОЦ № 12, изготовленных штамповкой из перспективной высокоосколочной стали 80Г2С и снаряженных взрыв-

чатыми составами шести типов (три штатных ВВ — ТНТ, А-IX-2, окфол — и три новых пластизольных состава — ОЛД-20, ОЛА-8, ОЛА-15). В недавно опубликованных работах [13, 14] показано, что СОЦ № 12 использовались для оценки метательно-дробящего действия нетрадиционных для области осколочно-фугасных БП видов ВС — высокоэнергетических детонационно-способных твердых ракетных топлив баллиститного и смесового типа (корпуса СОЦ изготовлены штамповкой из стали С-60 и испытаны на базе ФГУП «ФЦДТ «СОЮЗ3»).

В настоящей работе обобщены результаты экспериментальных исследований [10–12, 15–20], выполненных с использованием СОЦ № 12 на испытательной базе АО «ГосНИИ «Кристалл», проанализированы массово-числовые характеристики осколочных спектров СОЦ, снаряженных различными типами ВВ (в том числе три штатных состава и восемь новых перспективных ВС), выполнена сравнительная оценка качественных и количественных показателей осколочно-дробящего действия для новых ВС. Проанализированы результаты статистической обработки осколочных масс СОЦ по новому способу — способу Одинцова. Установлены также корреляционные зависимости между массово-числовыми характеристиками осколочного спектра СОЦ № 12 и свойствами ВВ, которые использовались для их снаряжения.

В качестве вариантов снаряжения макетов СОЦ № 12, изготовленных двумя методами — точением и штамповкой из наиболее массовой снарядной стали С-60 и одним методом — штамповкой из высокоосколочной эвтектоидной стали 80Г2С, использовались и широко известные штатные ВВ (ТНТ, А-IX-2, окфол), и новые перспективные ВС разработки АО «ГосНИИ «Кристалл»:

- холодно-прессовые ГАСС-8, ГАСС-12, ТАСС-12 и Гекфал-12КМ на основе гексогена — Г (или тэна — Т), алюминия — А (содержание Al \approx 8 или 12 %) и флегматизатора — связующего;
- литьевые — ГЛА-15, ОЛА-8, ОЛА-15 и ОЛД-20 на основе гексогена — Г (или октогена — О), пластизольной связки и алюминия — Al (содержание Al 8 или 15 %).

На примере ВС наряду с качественным и количественным сравнением характеристик их дробящего действия с характеристиками штатных ВВ рассмотрим особенности и преимущества статистической обработки осколочных масс СОЦ и натуральных изделий (осколочно-фугасных БП) по предложенному и запатентованному МГТУ им. Н.Э. Баумана новому способу обработки осколочного спектра — способу Одинцова (патент № 2362968 РФ), проанализируем зависимости массово-числовых характеристик осколочного спектра СОЦ № 12, изготовленного штамповкой из сталей С-60 и 80Г2С, от основных свойств ВВ — скорости детонации, давления Чепмена — Жуге и скорости метания оболочки по методике Т-20 (табл. 1).

Основные характеристики исследованных взрывчатых составов

Взрывчатое вещество	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	p_{c-J} , ГПа	W_{15} , км/с
ТНТ	1,59	6,89	18,4	1,40
А-IX-2	1,77	8,10	22,6	1,63
Окфол-3,5	1,77	8,59	28,9	1,72
ГАСС-8	1,77	8,42	27,2	1,74
ГАСС-12	1,79	8,31	25,8	1,73
ГАСС-12	1,76	8,01	23,9	1,72
Гекфал-12	1,77	8,31	25,8	1,73
ГЛА-15	1,79	7,90	23,1	1,69
ОЛД-20	1,77	8,43	31,5	1,74
ОЛА-8	1,82	8,45	28,4	1,77
ОЛА-15	1,82	8,14	25,4	1,74

Обозначения: ρ_0 — плотность заряда ВВ; D — скорость детонации; p_{c-J} — давление в фронте детонационной волны (давление Чемпена — Жуге); W_{15} — скорость расширения медной цилиндрической оболочки (при радиусе $\Delta R = 15$ мм).

Сравнительная оценка дробящего действия штатных и новых взрывчатых составов. Оценка дробящих свойств новых ВС, соответствующих, по мнению разработчиков, современным требованиям по технологичности и эксплуатационной безопасности, которые предъявляются к перспективным ВВ и ВС, а также предварительно «оптимизированных» для получения высоких скоростей метания и качественного дробления оболочек, проведена в АО «ГосНИИ «Кристалл» в соответствии с ГОСТ В 25430–82.

Схема проведения эксперимента дана на (рис. 1, а). Теоретические и методические вопросы применения осколочных цилиндров изложены в работах [4–6]. СОЦ № 12 закрытого типа (рис. 1, б и в) характеризуется удлинением камеры $\lambda_0 = L_0/d_a = 4$ и объемом $V = 200$ см³, относительная толщина стенки составляет 1/6 объема камеры. Пропорции цилиндра защищены патентом № 2025646 РФ. Оценка дробящего действия ВС выполнена на основании подсчета числа осколков различных массовых фракций, собранных во взрывной камере после опыта. В качестве улавливающей среды использовались опилки. Для новых ВС удалось достигнуть высокого уровня сбора осколочной массы. В частности, для ГАСС-8 и ГАСС-12 данный показатель составил 98,5 и 98,3 % соответственно.

Результаты исследований по определению осколочно-дробящего действия новых литевых и холодно-прессовых ВС в сравнении с данными для штатных ВВ (ТНТ, А-IX-2, окфол) приведены в табл. 2. Цилиндры изготовлены точением из стали С-60 и штамповкой этой стали и новой эвтектоидной кремнисто-марганцевой стали 80Г2С.

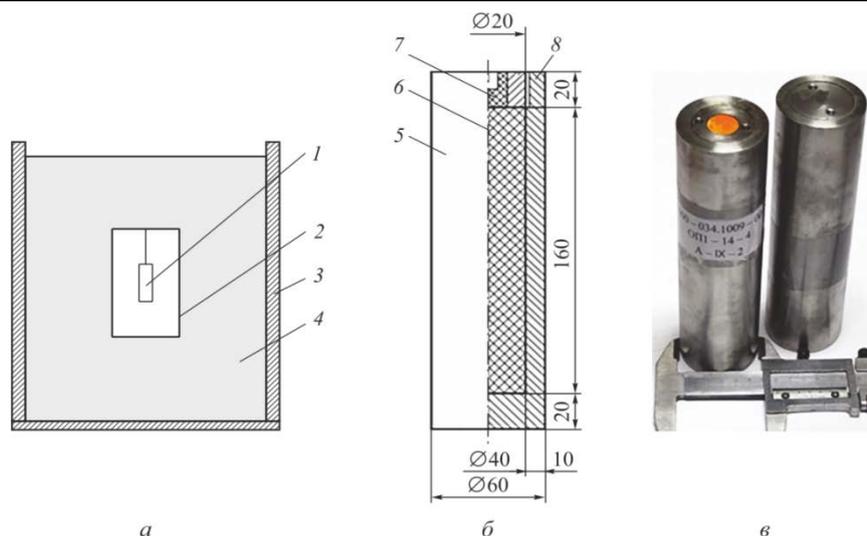


Рис. 1. Схема эксперимента (а), схематический (б) и общий (в) вид стандартных осколочных цилиндров RSFC № 12 закрытого типа:

1 — макет СОЦ; 2 — картонный цилиндр; 3 — хромоникелевый цилиндр (улавливатель); 4 — тормозящая среда (древесные опилки); 5 — корпус; 6 — заряд ВВ; 7 — дополнительный детонатор; 8 — крышка

Таблица 2

Сравнительные характеристики дробящего действия штатных взрывчатых веществ и новых взрывчатых составов

Марка стали	Метод изготовления корпуса	Взрывчатое вещество	Плотность взрывчатого вещества ρ_0 , г/см ³	Число осколков			Относительное содержание фракций осколков		
				$N_{0,25}$	$N_{0,5}$	$N_{1,0}$	μ_m	μ_c	μ_k
С-60	Штамповка	ТНГ	1,59	745	607	451	0,113	0,221	0,665
		А-IX-2	1,77	984	751	527	0,153	0,304	0,542
		Окфол	1,77	1216	933	626	0,213	0,390	0,397
С-60	Точение	ГАСС-8	1,77	1647	1150	739	0,275	0,499	0,226
С-60		ГАСС-12	1,78	1528	1115	720	0,259	0,485	0,256
С-60		ТАСС-12	1,76	1344	966	624	0,227	0,374	0,398
С-60		Гекфал-12КМ	1,77	1519	1055	684	0,288	0,452	0,260
С-60		ГЛА-15	1,79	1545	1110	714	0,270	0,488	0,241
С-60		ОЛА-8	1,82	1649	1155	750	0,282	0,507	0,211
С-60		ОЛА-8	1,82	1132	840	604	0,175	0,347	0,478
С-60		ОЛА-15	1,82	1234	919	631	0,190	0,375	0,435
80Г2С		Штамповка	ОЛА-8	1,82	1712	1166	717	0,281	0,502
80Г2С	ОЛА-15		1,82	1758	1256	770	0,317	0,513	0,170
80Г2С	ОЛД-20		1,77	1829	1251	720	0,356	0,454	0,189
80Г2С	ТНГ		1,59	948	737	536	0,15	0,30	0,55
80Г2С	ТНГ		1,59	1087	862	630	0,162	0,373	0,465
80Г2С	А-IX-2		1,77	1499	1070	659	0,265	0,422	0,313

Обозначения: $N_{0,25}$, $N_{0,5}$, $N_{1,0}$ — соответственно числа осколков массой более 0,25, 0,5 и 1,0 г; μ_m , μ_c , μ_k — соответственно массовое содержание мелкой ($m \leq 1$ г), средней ($1 \text{ г} < m \leq 4$ г) и крупной ($m > 4$ г) фракций.

Разработана классификационная диаграмма качества дробления СОЦ № 12 из стали марок С-60 и 80Г2С, снаряженных рассмотренными выше ВС (рис. 2).

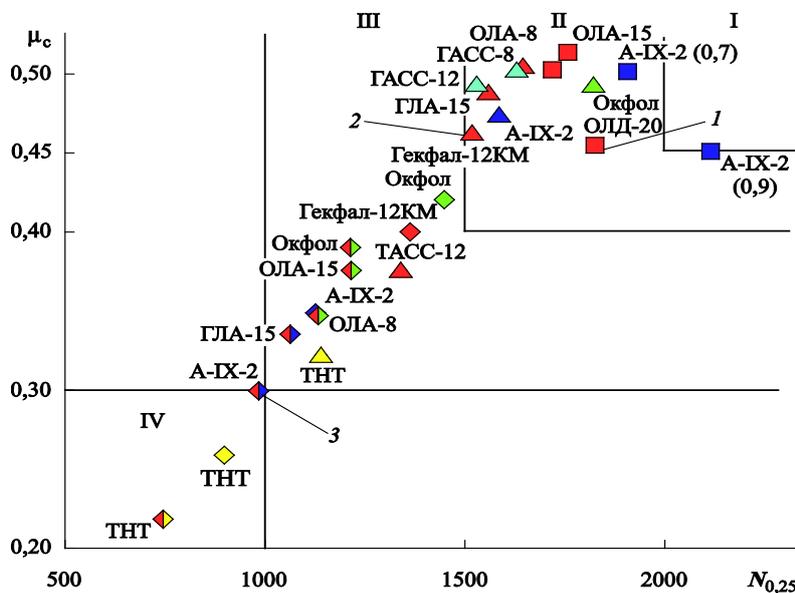


Рис. 2. Классификационная диаграмма качества дробления стандартного осколочного цилиндра RSFC № 12:

I–IV — области высококачественного, качественного, удовлетворительного и неудовлетворительного дробления соответственно; 1 — штампованный СОЦ (сталь 80Г2С); 2 — точеный СОЦ (сталь С-60); 3 — штампованный СОЦ (сталь С-60)

Классификация уровней качества дробления СОЦ № 12 и условия, при которых они достигаются, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Классификация уровней качества дробления СОЦ

Условия	Дробление
$N_{0,25} \geq 2000;$ $\mu_c \geq 0,45;$ $Q_F \geq 900$	Высококачественное (класс I)
$N_{0,25} \geq 1500;$ $\mu_c \geq 0,4;$ $Q_F \geq 600$	Качественное (класс II)
$N_{0,25} \geq 1000;$ $\mu_c \geq 0,3;$ $Q_F \geq 300$	Удовлетворительное (класс III)

Условия	Дробление
$N_{0,25} < 1000$; $\mu_c < 0,3$; $Q_F < 300$	Неудовлетворительное (класс IV)

Для проведения сравнительной оценки качества дробления СОЦ № 12 различными ВС в некоторых случаях целесообразно использовать однопараметрический показатель Q_F (см. табл. 3), определяемый по формуле

$$Q_F = N_{0,25}\mu_c,$$

где $N_{0,25}$ — число осколков с массой более 0,25 г; μ_c — массовое содержание средней (1 г < m ≤ 4 г) фракции.

Анализ данных по осколочной эффективности новых ВС (см. табл. 2, рис. 2) в сравнении с данными для штатных ВВ (ТНТ, А-IX-2, окфол) показывает, что использованные в опытах новые холодно-прессовые и литьевые пластизольные ВС (с содержанием Al 8, 12 и 15 %) в сочетании с нормализованной снарядной сталью С-60 и эвтектоидной кремнисто-марганцевой сталью 80Г2С по основным осколочным характеристикам (μ_c , $N_{0,25}$, $N_{0,5}$, $N_{1,0}$) обеспечивают приемлемый уровень дробления, превышающий уровень базового состава А-IX-2 (штатного ВВ для отечественных осколочно-фугасных боеприпасов) и приближающийся к уровню окфола — одного из самых мощных отечественных ВВ, используемых, как правило, в кумулятивных БП.

Особый интерес с точки зрения перспектив повышения осколочной эффективности БП представляет статистическая обработка осколочных масс, полученных при испытаниях макетов СОЦ № 12 из разработанной в 1982 г. Т.Ф. Волюновой и В.А. Одинцовым эвтектоидной стали 80Г2С (0,8 % С, 2 % Mn, 1 % Si). Проведенные тогда же испытания указанной стали на СОЦ при снаряжении составом А-IX-2 подтвердили ее высокие осколочные свойства [6] (см. рис. 2, в скобках указано процентное содержание С в штатном составе А-IX-2 стали).

Для штампованных СОЦ (рис. 3, см. рис. 2) из стали 80Г2С в сочетании с тремя новыми пластизольными составами — ОЛД-20, ОЛА-8 и ОЛА-15 — хотя и не достигнуто попадание в зону высококачественного дробления (область I), но, в частности, для состава ОЛА-15 условие высококачественного дробления $Q_F = N_{0,5}\mu_c \geq 900$ выполняется (на пределе). Отметим также, что для указанных трех составов выполняется и критически важное условие $\mu_c \geq 0,45$ по отношению к содержанию средней фракции осколков (1 г < m ≤ 4 г), являющейся наиболее продуктивной частью осколочной массы.

Из практики известно, что нормализованная снарядная сталь С-60 не отличается полноценным дроблением [1–6, 10, 11], и данные эксперименты это также подтверждают. Об этом, в частности, свидетельствует наличие в спектре СОЦ сверхдлинных осколков, или так называемых сабель, с относительным удлинением $\lambda > 12...15$ (рис. 4).

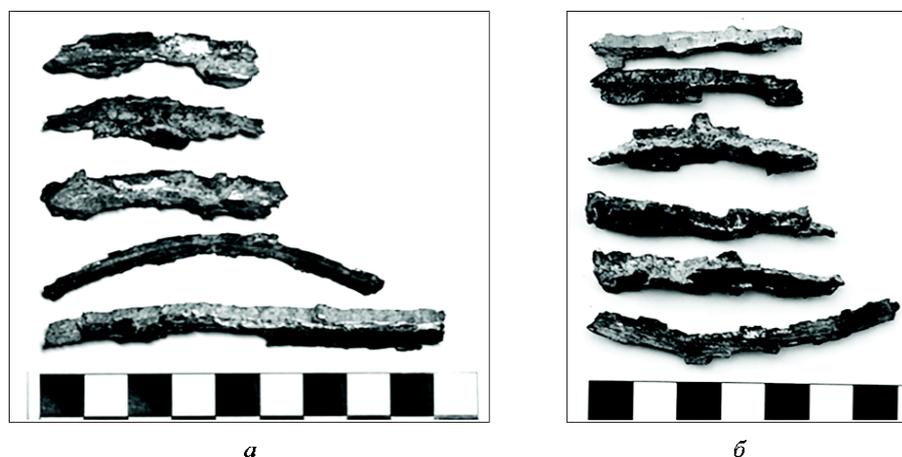


Рис. 4. Вид наиболее длинных осколков СОЦ № 12 из стали С-60, снаряженных ГАСС-8 (а) и ГАСС-12 (б)

Значение показателя λ определяется соотношением

$$\lambda = \left[\frac{\gamma_0 l^3}{m} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где γ_0 — плотность металла, г/мм³ (для стали $\gamma_0 = 7,85 \cdot 10^{-3}$ г/мм³); l — длина осколка, мм; m — масса осколка, г.

Саблеобразование связано с быстрым распространением за фронтом детонационной волны системы продольных магистральных трещин. Им способствуют относительно низкие значения растягивающих осевых напряжений в процессе расширения оболочки [4–6]. При определенных условиях возможно образование «прутьев» т. е. осколков-сабель, имеющих длину, равную длине цилиндра. Саблеобразование — главное препятствие в получении высококачественных осколочных спектров и натуральных изделий (осколочно-фугасных боеприпасов). В то же время остается достаточно мощный резерв для улучшения качественных и количественных показателей осколочного спектра БП.

Установлены характеристики пяти наиболее длинных осколков, позволяющие оценить склонность процесса дробления нормализованной стали С-60 к саблеобразованию (табл. 4). Основные морфоло-

гические характеристики осколочных спектров СОЦ для данных комбинаций «сталь — ВВ» (С-60Т — ГАСС-8 и С-60Т — ГАСС-12) представлены в табл. 5.

Таблица 4

Характеристики для выборки пяти наиболее длинных осколков СОЦ № 12 из стали С-60, снаряженных ГАСС-8 [17] и ГАСС-12

Номер осколка	l , мм		m , г		λ	
	ГАСС-8	ГАСС-12	ГАСС-8	ГАСС-12	ГАСС-8	ГАСС-12
1	91,40	70,85	19,4	5,77	17,6	22,0
2	77,85	57,85	6,64	10,5	23,75	12,0
3	57,15	56,45	12,51	11,4	10,82	11,12
4	51,1	51,8	7,66	10,4	11,7	10,24
5	49,9	48,05	10,04	7,13	9,85	11,05

Таблица 5

Морфологические характеристики осколочных спектров

Взрывчатое вещество	l_{\max} , мм	$\lambda_{l_{\max}}$	l_{20} , мм	λ_{20}	l_{100} , мм	λ_{100}	l_{300} , мм	λ_{300}
ГАСС-8	91,4	17,6	48,0	11,11	34,45	8,07	25,44	6,11
ГАСС-12	70,85	22,1	46,3	11,2	33,7	7,9	26,18	6,30

Обозначения: l_{\max} , $\lambda_{l_{\max}}$ — максимальные длина и удлинение осколка; l_{20} , λ_{20} — средняя длина и удлинение 20 наиболее длинных осколков; l_{100} и l_{300} , λ_{100} и λ_{300} — то же соответственно для 100 и 300 наиболее длинных осколков.

Обработка осколочных масс СОЦ № 12 по способу Одинцова.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана предложен новый способ обработки осколочного спектра — способ Одинцова (патент № 2362968 РФ). Его техническая реализация состоит в том, что масса, длина, максимальная, минимальная и средняя площади проекций определяются для всех осколков спектра СОЦ (рис. 5, а) [21]. В первом приближении наиболее простым и доступным является определение двух характеристик спектра осколков, таких как масса и длина для каждого осколка. По массе и длине осколка можно получить следующие характеристики:

- относительное удлинение осколка λ ;
- объем осколка V , см³;
- среднюю площадь поперечного сечения осколка B , мм²;
- удельную массу осколка m' ;
- максимальную поперечную нагрузку осколка q_{\max} .

В качестве дополнительной информации для каждого осколка может быть определен морфологический тип осколка (рис. 5, б) по следующим признакам:

тип A — осколок, содержащий обе исходные поверхности;
 тип B — осколок, содержащий одну исходную поверхность (B' — осколок контактной зоны, примыкающей к заряду; B'' — осколок внешней поверхности цилиндра).

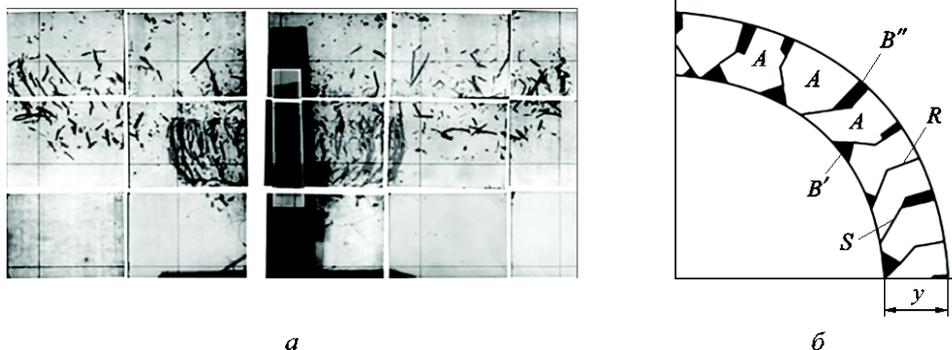


Рис. 5. Рентгенограмма процесса взрыва СОЦ № 12 из стали С-60 [21] (а) и схема формирования осколочного спектра цилиндров, изготовленных из средне- и высокоуглеродистых сталей (б):

A, B — основные и сопутствующие осколки; R — поверхность хрупкого отрывного разрушения; S — поверхность сдвигового разрушения по площадкам скольжения; y — глубина зоны отрывного разрушения

Способ Одинцова значительно более трудоемкий, чем обычная сортировка по массовым группам, но обеспечивает получение существенно большего объема информации.

Представим результаты статистической обработки не всей осколочной массы СОЦ № 12, а только ее части — для осколков массой более 2 г. Соответствующий двумерный спектр в координатах $m — l$ (первичные измерения) и $m — \lambda$ (перестроенные данные) представлен на рис. 6 и 7.

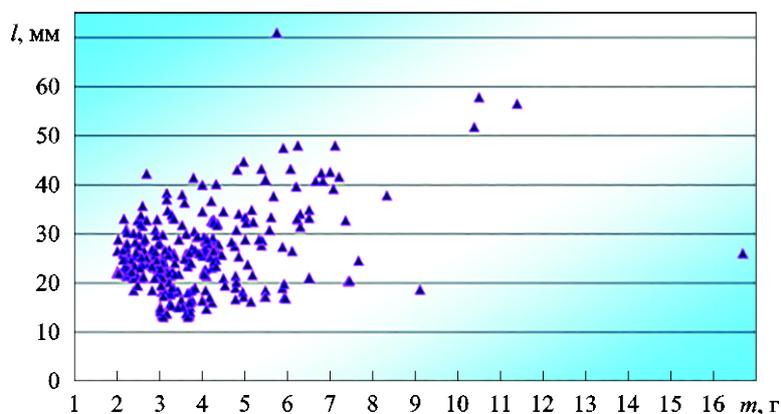


Рис. 6. Осколочный спектр стандартного осколочного цилиндра, снаряженного ГАСС-12, в координатах $m — l$

Из данных на рис. 6 следует, что компоненты случайного вектора $\{m, l\}$ являются зависимыми, а из рис. 7 — что осколки значительного удлинения λ (удлиненные и длинные) в больших количествах присутствуют и в группах средних по массе ($1 \text{ г} < m \leq 4 \text{ г}$) осколков.

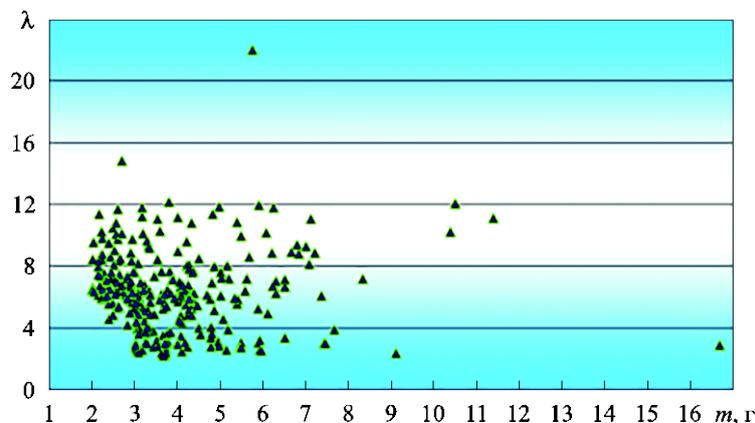


Рис. 7. Осколочный спектр стандартного осколочного цилиндра, снаряженного ГАСС-12, в координатах $m - \lambda$

В ходе исследований по изысканию новых сталей выяснилось, что граничное значений λ между нормальными и длинными осколками ($\lambda = 8$), принятое в работе [6], сильно завышено ($\lambda = 7,5$ для кремнистых сталей уже нельзя считать нормальным). Однако диапазон длинных осколков ($\lambda = 8 \dots 15$) слишком широк, что не позволяет обоснованно подходить к отбору снаряжных сталей. Считаём целесообразным введение новой шкалы: $\lambda \leq 4$ — нормальные, $4 < \lambda \leq 8$ — удлиненные, $8 < \lambda \leq 12$ — длинные и $\lambda > 12$ — сверхдлинные осколки.

Таким образом, статистическая обработка осколочных масс по способу Одинцова, выполненная в настоящей работе (в развитие более ранних исследований [18–20] и других работ, посвященных анализу осколочных спектров СОЦ № 12 и натуральных изделий из стали С-60 в сочетании с различными типами ВВ), позволила установить, что большое удлинение характерно не только для тяжелых фракций осколков. Удлинение $\lambda > 4$ (и даже $\lambda > 8$) свойственно и для средних осколков массой $2 \dots 3 \text{ г}$ (см. рис. 7), и для легких ($m = 0,25 \dots 1,0 \text{ г}$), т. е. имеет универсальный характер. Это требует дальнейшего, более детального изучения явления саблеобразования и связанных с ним факторов (решающей роли продольных магистральных трещин, ковочной анизотропии, ветвления трещин и т. п.).

Установление корреляционных зависимостей. Несомненный практический интерес представляют установление и сравнительный

анализ корреляционных зависимостей массово-числовых характеристик осколочного спектра СОЦ № 12, изготовленных штамповкой [12, 22, 23], от свойств ВВ (подобные зависимости для цилиндров из стали С-60, изготовленных точением, приведены в работах [10, 11]).

На рис. 8 представлены уравнения линий регрессии и коэффициенты корреляции: $N_{0,25} = R(D)$; $\mu_c = R(D)$; $N_{0,25} = R(W_{15})$; $\mu_c = R(W_{15})$; $N_{0,25} = R(p_{c-J})$ и $\mu_c = R(p_{c-J})$, построенные по экспериментальным точкам для семи различных комбинаций «металл (сталь С-60, штамповка) — ВВ».

Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции можно сравнить с уравнениями, полученными в работе [12] для шести комбинаций «сталь марки 80Г2С — ВВ» (табл. 6).

Как следует из анализа данных на рис. 8 и в табл. 6, для стали С-60 наиболее тесная связь отмечается между массово-числовыми характеристиками спектра ($N_{0,25}$, μ_c) и такими свойствами ВВ, как скорость детонации (коэффициент корреляции чуть больше 0,9) и скорость метания медной цилиндрической оболочки (коэффициент корреляции около 0,94). Теснота связи между характеристиками спектра ($N_{0,25}$, μ_c) и давлением детонации несколько ниже (коэффициент корреляции около 0,87). Отметим, что расчет давления p_{c-J} для всех рассмотренных ВС выполнен по экспресс-методике [24], в отличие от D и W_{15} , определенных в АО «ГосНИИ «Кристалл» экспериментально — по методике Т-20.

Для стали 80Г2С также отмечается тесная корреляционная связь между характеристиками спектра ($N_{0,25}$, μ_c) и метательной способностью ВВ. Наивысший коэффициент корреляции $r = 0,967$ получен именно для зависимости $W_{15} — N_{0,25}$. Для относительной массы средней фракции μ_c , как и в предыдущем случае, наиболее тесной является зависимость от величины W_{15} ($r = 0,963$).

Отметим, что установленная высокая теснота связей $W_{15} — N_{0,25}$ и $W_{15} — \mu_c$ ($r \geq 0,94$) указывает на существование приближающейся к функциональной зависимости между метательной способностью и дробящим действием данного ВС. Это позволяет существенно упростить весьма громоздкие и трудоемкие щитовые испытания натуральных изделий — осколочно-фугасных боеприпасов (в частности, на этапе поиска наиболее перспективных комбинаций «металл — ВВ»), а в определенных случаях и вовсе исключить их. Дальнейшие теоретические исследования должны быть направлены на уточнение количественных зависимостей параметров распределения осколочных

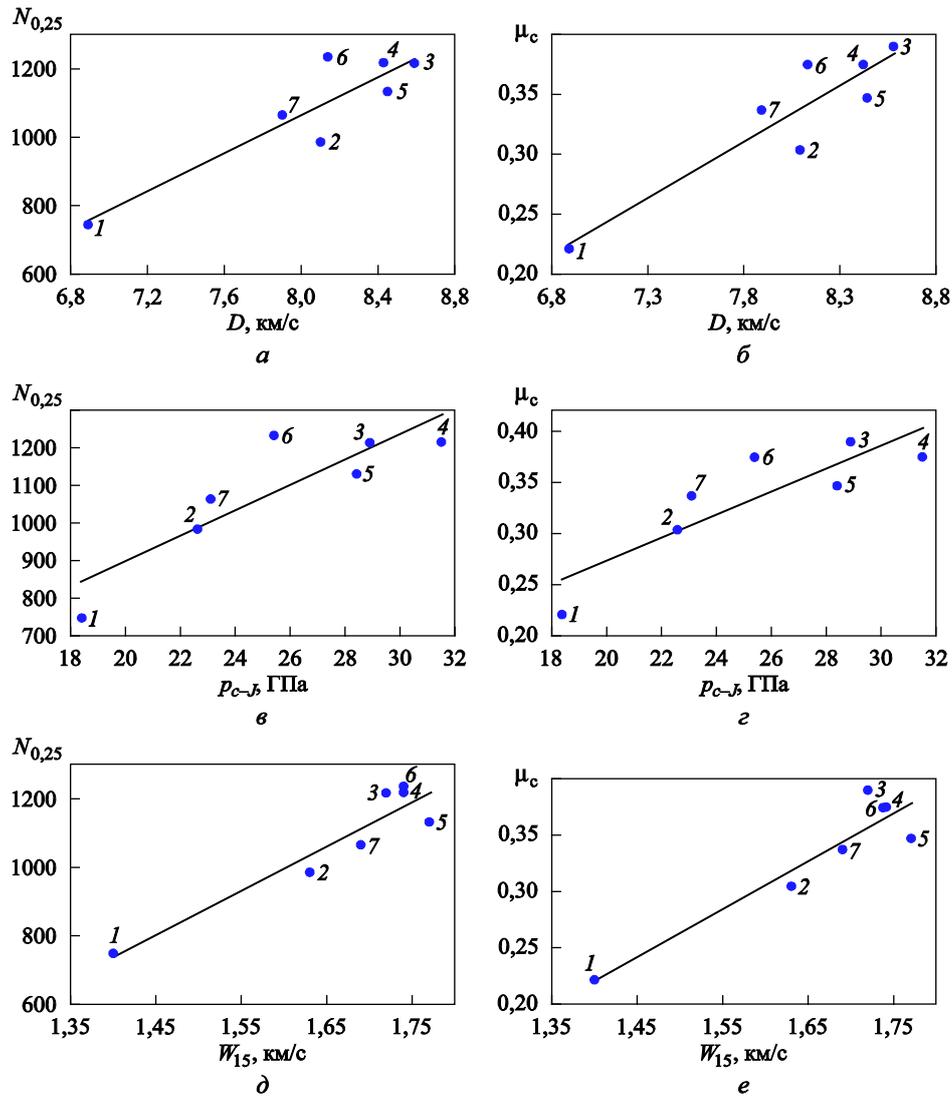


Рис. 8. Регрессионная зависимость и экспериментальные точки для семи комбинаций «сталь С-60 — взрывчатое вещество»:

1 — ТНТ; 2 — А-IX-2; 3 — окфол; 4 — ОЛД-20; 5 — ОЛА-8Т; 6 — ОЛА-15Т; 7 — ГЛА-15М

Таблица 6

Уравнение регрессии и коэффициенты корреляции

Аргумент	Корреляционно-зависимая величина	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Марка стали
D	$N_{0,25}$	$N_{0,25} = 276,78D - 1149,5$	0,902	С-60
		$N_{0,25} = 459,38D - 2170,2$	0,893	80Г2С
W_{15}		$N_{0,25} = 1299,8W_{15} - 1086,1$	0,941	С-60
		$N_{0,25} = 2226,1W_{15} - 2159,3$	0,967	80Г2С

Аргумент	Корреляционно-зависимая величина	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Марка стали
p_{c-J}	$N_{0,25}$	$N_{0,25} = 34,142 p_{c-J} + 214,92$	0,871	С-60
		$N_{0,25} = 57,669 p_{c-J} + 59,132$	0,860	80Г2С
D	μ_c	$\mu_c = 0,0929D - 0,4142$	0,916	С-60
		$\mu_c = 0,156D - 0,4874$	0,907	80Г2С
W_{15}	μ_c	$\mu_c = 0,427W_{15} - 0,3774$	0,936	С-60
		$\mu_c = 0,5492W_{15} - 0,4665$	0,963	80Г2С
p_{c-J}	μ_c	$\mu_c = 0,0112 p_{c-J} + 0,0504$	0,864	С-60
		$\mu_c = 0,0128 p_{c-J} + 0,117$	0,772	80Г2С

спектров стандартных цилиндров и натуральных изделий (осколочно-фугасных боеприпасов) от свойств металла и ВВ, в том числе применительно к новой гиперэкспоненциальной статистической модели осколочного спектра, получившей в последнее время двойное наименование: модель Одинцова — Грэди [9, 25, 26].

Заключение. Проведен анализ основных массово-числовых и морфологических характеристик осколочных спектров СОЦ закрытого типа № 12, изготовленных методами точения и/или штамповки из стали марок С-60 и 80Г2С и снаряженных новыми литейными и холодно-прессовыми ВС, разработанными в АО «ГосНИИ «Кристалл».

На примере комбинаций С-60 — ГАСС-8 и С-60 — ГАСС-12 рассмотрены особенности и предварительные результаты статистической обработки осколочных масс СОЦ по предложенному в МГТУ им. Н.Э. Баумана новому способу обработки осколочного спектра — способу Одинцова. Установлено, что большое относительное удлинение ($\lambda > 4 \dots 8$) характерно не только для тяжелых фракций осколков: удлинение $4 < \lambda \leq 8$ (и даже $\lambda > 8$) свойственно и для средних фракций осколков массой 2...3 г, и для лёгких ($m = 0,25 \dots 1,0$ г), т. е. имеет универсальный характер.

Проанализированы корреляционные зависимости массово-числовых характеристик осколочных спектров СОЦ № 12, изготовленных штамповкой из стали марок С-60 и 80Г2С, от свойств ВВ: скорости детонации, давления Чепмена — Жуге и метательной способности ВВ (определяемой скоростью расширения оболочки W_{15} по методике Т-20). Установленная высокая теснота связей $W_{15} — N_{0,25}$ и $W_{15} — \mu_c$ ($r \geq 0,94$) указывает на существование приближающейся к функ-

циональной зависимости между метательной способностью и дробящим действием взрывчатых составов.

В качестве одного из перспективных направлений продолжения экспериментально-теоретических исследований с использованием стандартных осколочных цилиндров предложено уточнение количественных зависимостей параметров распределения осколочных спектров СОЦ (а в дальнейшем и натуральных изделий — осколочно-фугасных боеприпасов) от свойств металла (материала корпуса) и ВВ, в том числе применительно к новой гиперэкспоненциальной статистической модели осколочного спектра — модели Одинцова — Грэди.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. и др. *Боеприпасы*. В 2 т. Селиванов В.В., ред. 3-е изд., испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, т. 1, 506 с.
- [2] Осипова Л., Парфенов Д., Никифоров В. Модернизация 100-мм выстрелов с ОФС для объектов бронетанковой техники. *Обозрение армии и флота*, 2007, № 2, с. 32–35.
- [3] Одинцов В.А. *Конструкции осколочных боеприпасов. Часть 2. Артиллерийские снаряды*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 56 с.
- [4] Одинцов В.А. Двухкомпонентная модель спектра разрушения цилиндров. *Механика импульсных процессов. Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*, № 387. Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1982, 56 с.
- [5] Одинцов В.А. *Моделирование процессов фрагментации с помощью унифицированных цилиндров*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991, 60 с.
- [6] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. Орленко Л.П., ред. Изд. 3-е, испр. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [7] Sternberg H.M. Fragment weight distributions from natural fragmenting cylinders loaded with various explosives. *NOLTR 73–83*, Naval Ordnance Laboratory, Maryland, 1973.
- [8] Crowe C.R., Mock W., Holt W.H., Criffin O.H. Dynamic fracture and fragmentation of cylinders. *TR-3449*, Naval Surface Weapon Center, Dahlgren laboratory, 1976.
- [9] Одинцов В.А. Гиперэкспоненциальные спектры взрывного разрушения металлических цилиндров. *Известия РАН. Механика твердого тела*, 1992, № 5, с. 48–55.
- [10] Одинцов В.А., Шкалябин И.О. Дробящее действие смесевых ВВ в унифицированных цилиндрах. *Физика горения и взрыва*, 1994, № 3, с. 147–150.
- [11] Шкалябин И.О., Одинцов В.А., Колганов Е.В. Прогнозирование эффективности смесевых и индивидуальных ВВ в осколочных боеприпасах. *Сб. докл. науч. конф. ВРЦ РАРАН: Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения*. Саров, Изд-во ВНИИЭФ, 2000, с. 404–407.
- [12] Одинцов В.А., Бармин А.В., Имховник Н.А. Осколочные спектры стандартных цилиндров RSFC, изготовленных из новой высокоосколочной стали 80Г2С. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-565

- [13] Куликов В.Н., Осавчук А.Н., Имховик Н.А., Одинцов В.А. Детонационные характеристики и метательнo-дробящее действие многокомпонентных взрывчатых составов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-564
- [14] Имховик Н.А., Одинцов В.А., Осавчук А.Н., Куликов В.Н. Осколочно-кинетические боеприпасы с адаптивными зарядами ВВ двойного назначения (на основе высокоэнергетических баллистических и смесевых ТРТ). *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*, 2017, № 2, с. 86–95.
- [15] Кожевников В.Г., Бармин А.В., Евстифеев М.Е., Карачев А.Г., Колганов Е.В., Одинцов В.А., Имховик Н.А. Дробящее действие состава ОЛА-8 в стандартном осколочном цилиндре № 12. *Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы*, 2010, № 1, с. 38–42.
- [16] Бармин А.В., Евстифеев М.Е., Ильин В.П., Кожевников В.Г., Одинцов В.А., Имховик Н.А. Осколочный спектр стандартного цилиндра № 12 RSFC, снаряженного пластизольным взрывчатым составом. *Оборонная техника*, 2010, № 1–2, с. 15–19.
- [17] Бармин А.В., Печенев Ю.Г., Карачев А.Г., Кожевников В.Г., Шкалябин И.О., Ильин В.П., Колганов Е.В., Одинцов В.А., Имховик Н.А. Испытание стандартного осколочного цилиндра RSFC № 12, снаряженного составом ГАСС-8. *Оборонная техника*, 2011, № 2–3, с. 15–20.
- [18] Бармин А.В., Шкалябин И.О., Кожевников В.Г., Колганов Е.В., Ильин В.П., Имховик Н.А., Одинцов В.А. Осколочные спектры стандартных цилиндров RSFC № 12, снаряженных новыми алюминизированными ВВ. *Горение и взрыв*, 2012, т. 5, № 5, с. 366–372.
- [19] Бармин А.В., Карачев А.Г., Кожевников В.Г., Колганов Е.В., Печенев Ю.Г., Одинцов В.А., Имховик Н.А. Осколки корпусов естественного дробления как фактор риска при оценке противоосколочной стойкости средств индивидуальной защиты. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2011, вып. 1–2, с. 27–35.
- [20] Одинцов В.А., Колганов Е.В., Бармин А.В., Имховик Н.А., Шкалябин И.О. Зависимость массово-числовых характеристик осколочных спектров стандартных осколочных цилиндров от параметров выборки длинных осколков. *Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2012, вып. 9–10, с. 13–18.
- [21] Бармин А.В., Гладцинов А.В., Власов М.А., Одинцов В.А., Имховик Н.А. Изучение процесса взрыва стандартных осколочных цилиндров RSFC, снаряженных взрывчатыми составами ОЛД-20 и ГЛА-15, с использованием метода рентгеноимпульсной съемки и устройств для улавливания осколков. *Горение и взрыв*, 2013, т. 6, № 6, с. 315–319.
- [22] Бармин А.В., Печенев Ю.Г., Евстифеев М.Е., Карачев А.Г., Одинцов В.А., Имховик Н.А. Зависимость осколочных спектров стандартного цилиндра № 12 от характеристик взрывчатых составов. *Горение и взрыв*, 2013, т. 6, № 6, с. 320–326.
- [23] Бармин А.В., Печенев Ю.Г., Одинцов В.А., Имховик Н.А., Мачнева И.П. Анализ осколочной эффективности новых взрывчатых составов с использованием стандартного осколочного цилиндра RSFC № 12. *Материалы VIII Всерос. конф. «Энергетические конденсированные системы»*. Черноголовка, Дзержинский, Изд-во ИПХФ РАН, 2016, с. 231–235.
- [24] Колганов Е.В., Смирнов С.П., Смирнов А.С. Простые методы расчета характеристик детонации и общая методология разработки методов оценки параметров взрыва. *Тр. Междунар. конф. «IX Харитоновские тематиче-*

- ские научные чтения»: *Экстремальное состояние вещества, детонация, ударные волны*. Саров, Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007, с. 144–146.
- [25] Бармин А.В., Шкалябин И.О., Кожевников В.Г., Колганов Е.В., Ильин В.П., Имховник Н.А., Одинцов В.А., Резничук И.Ю. Представление осколочных спектров стандартных цилиндров RSFC № 12, снаряженных новыми алюминизированными ВВ, с использованием гиперэкспоненциальной статистической модели. *Горение и взрыв*, 2012, т. 5, № 5, с. 373–378.
- [26] Grady D. *Fragmentation of Rings and Shells: The Legacy of N.F. Mott* Publisher: Springer; 1st Edition, November 23, 2006.

Статья поступила в редакцию 12.04.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бармин А.В., Печенев Ю.Г., Одинцов В.А., Имховник Н.А., Мачнева И.П. Анализ осколочно-дробящих свойств новых взрывчатых составов с использованием стандартного осколочного цилиндра RSFC № 12. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-8-1795>

Бармин Алексей Владимирович — инженер АО «ГосНИИ «Кристалл». Автор 20 научных работ и изобретений в области физики взрыва, механики разрушения, методов испытаний и основ теории осколочных боеприпасов.

Печенев Юрий Геннадьевич — канд. техн. наук, директор по науке АО «ГосНИИ «Кристалл». Автор более 100 научных работ, двух монографий и более 40 патентов.

Одинцов Владимир Алексеевич — основатель современной научной школы теории осколочных боеприпасов. Автор более 200 научных трудов и более 120 патентов, автор ГОСТа на испытания стандартных осколочных цилиндров.

Имховник Николай Александрович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-корр. РАЕН. Автор более 150 научных работ и 10 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

Мачнева Ирина Петровна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 35 научных работ и 8 изобретений в области теории осколочного действия боеприпасов, теории энергетических материалов, химической физики процессов горения и взрыва.

Analysis of fragmentation and brisance characteristics of new explosive compositions using the Russian Standard Fragmenting Cylinder no. 12

© A.V. Barmin¹, Yu.G. Pechenev¹, V.A. Odintsov², N.A. Imkhovik²,
I.P. Machneva²

¹JSC State scientific research institute Kristall, Dzerzhinsk,
Nizhny Novgorod Region, 606007, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

We analysed the results of statistical processing of fragment masses obtained in testing closed-end standard fragmenting cylinders no. 12 (RSFC — Russian Standard Fragmenting Cylinder) filled with the following explosive materials: four standard types and eight newly developed by the JSC State scientific research institute Kristall (four castable and four cold-pressed compositions). RSFC casings were manufactured from the C60 and 80G2S steels by lathing and stamping. We used the following combinations of steel and explosive to discuss the specifics of statistical fragment mass processing for the RSFC no. 12 according to a new fragmentation spectrum processing technique, the Odintsov method (patent no. 2362968RU): C60 — GASS-8 and C60 — GASS-12. We analysed the correlations between two main mass and numerical fragmentation spectrum characteristics ($N_{0,25}$, μ_c) of the no. 12 RSFC stamped out of normalised artillery shell steel C60 and eutectoid steel 80G2S, and the following explosive composition properties: detonation velocity, Chapman–Jouguet pressure and shell expansion rate W_{15} — according to the T-20 technique. We determined that there exist these very close associations: W_{15} — $N_{0,25}$ and W_{15} — μ_c (correlation coefficient $r \geq 0,94$), which indicates that the dependence between acceleration potential and brisance of explosive compositions is close to being a function.

Keywords: Russian Standard Fragmenting Cylinder, explosive fragmentation, fragmentation spectrum, explosive compositions, detonation properties, acceleration potential, correlations

REFERENCES

- [1] Babkin A.V., Veldanov V.A., Gryaznov E.F. et al. *Boepripasy* [Munitions]. In 2 vols. Vol. 1. Selivanov V.V., ed. 3rd ed., revised. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [2] Osipova L., Parfenov D., Nikiforov V. *Obozrenie armii i flota — Army and Navy Review*, 2007, no. 2, pp. 32–35.
- [3] Odintsov V.A. *Konstruktsii oskolochnykh boepripasov* [Fragmentation munition designs]. Part 2. *Artilleriyskie snaryady* [Artillery shells]. Moscow, BMSTU Publ., 2002, 56 p.
- [4] Odintsov V.A. Dvukhkomponentnaya model spektra razrusheniya tsilindrov [Dual-lobe model of cylinder fragmentation spectrum]. *Mekhanika impulsnykh protsessov. Tr. MVTU im. N.E. Baumana* [Pulse process mechanics. Proc. of the Bauman MHTS], no. 387. Moscow, Bauman Moscow Higher Technical School, 1982, 56 p.
- [5] Odintsov V.A. *Modelirovanie protsessov fragmentatsii s pomoshchyu unifitsirovannykh tsilindrov* [Simulating fragmentation processes using standard cylinders]. Moscow, BMSTU Publ., 1991, 60 p.

- [6] 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.
- [7] Sternberg H.M. Fragment weight distributions from natural fragmenting cylinders loaded with various explosives. *NOLTR 73–83*, Naval Ordnance Laboratory, Maryland, 1973.
- [8] Crowe C.R., Mock W., Holt W.H., Criffin O.H. Dynamic fracture and fragmentation of cylinders. *TR-3449*, Naval Surface Weapon Center, Dahlgren laboratory, 1976.
- [9] Odintsov V.A. *Izvestiya RAN. Mekhanika tverdogo tela — Mechanics of Solids*, 1992, no. 5, pp. 48–55.
- [10] Odintsov V.A., Shkalyabin I.O. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1994, no. 3, pp. 147–150.
- [11] Shkalyabin I.O., Odintsov V.A., Kolganov E.V. Prognozirovaniye effektivnosti smesevykh i individualnykh VV v oskolochnykh boepripasakh [Predicting fragmentation munition performance of composite and chemically pure compound explosives]. *Sb. dokl. nauch. konf. VRTs RARAN: Sovremennyye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artilleriyskogo vooruzheniya* [Proc. of the Scientific Conference of the Volga Regional Center, Russian Academy of Missile and Artillery Sciences: Contemporary design and testing methods for missiles and artillery]. Sarov, All-Russian Research Institute Of Experimental Physics Publ., 2000, pp. 404–407.
- [12] Odintsov V.A., Barmin A.V., Imkhovik N.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-565
- [13] Kulikov V.N., Osavchuk A.N., Imkhovik N.A., Odintsov V.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 1 (13). DOI: 10.18698/2308-6033-2013-1-564
- [14] Imkhovik N.A., Odintsov V.A., Osavchuk A.N., Kulikov V.N. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannyye sistemy* (Munitions and high-energy condensed systems), 2017, no. 2, pp. 86–95.
- [15] Kozhevnikov V.G., Barmin A.V., Evstifeev M.E., Karachev A.G., Kolganov E.V., Odintsov V.A., Imkhovik N.A. *Boepripasy i vysokoenergeticheskie kondensirovannyye sistemy* (Munitions and high-energy condensed systems), 2010, no. 1, pp. 38–42.
- [16] Barmin A.V., Evstifeev M.E., Ilin V.P., Kozhevnikov V.G., Odintsov V.A., Imkhovik N.A. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2010, no. 1–2, pp. 15–19.
- [17] Barmin A.V., Pechenev Yu.G., Karachev A.G., Kozhevnikov V.G., Shkalyabin I.O., Ilin V.P., Kolganov E.V., Odintsov V.A., Imkhovik N.A. *Oboronnaya tekhnika — Defence technology*, 2011, no. 2–3, pp. 15–20.
- [18] Barmin A.V., Shkalyabin I.O., Kozhevnikov V.G., Kolganov E.V., Ilin V.P., Imkhovik N.A., Odintsov V.A. *Gorenie i vzryv — Combustion and Explosion*, 2012, vol. 5, no. 5, pp. 366–372.
- [19] Barmin A.V., Karachev A.G., Kozhevnikov V.G., Kolganov E.V., Pechenev Yu.G., Odintsov V.A., Imkhovik N.A. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu — Military Engineering. Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices. Issue 16*, 2011, iss. 1–2, pp. 27–35.
- [20] Odintsov V.A., Kolganov E.V., Barmin A.V., Imkhovik N.A., Shkalyabin I.O. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu — Military Engineering. Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices. Issue 16*, 2012, iss. 9–10, pp. 13–18.

- [21] Barmin A.V., Gladtsinov A.V., Vlasov M.A., Odintsov V.A., Imkhovik N.A. *Gorenie i vzryv — Combustion and Explosion*, 2013, vol. 6, no. 6, pp. 315–319.
- [22] Barmin A.V., Pechenev Yu.G., Evstifeev M.E., Karachev A.G., Odintsov V.A., Imkhovik N.A. *Gorenie i vzryv — Combustion and Explosion*, 2013, vol. 6, no. 6, pp. 320–326.
- [23] Barmin A.V., Pechenev Yu.G., Odintsov V.A., Imkhovik N.A., Machneva I.P. Analiz oskolochnoy effektivnosti novykh vzryvchatykh sostavov s ispolzovaniem standartnogo oskolochnogo tsilindra RSFC № 12 [Fragmentation performance analysis of new explosive compositions using the no. 12 Russian Standard Fragmenting Cylinder]. *Materialy VIII Vseros. konf. "Energeticheskie kondensirovannye sistemy"* [Proc. of 8th All-Russian conference Condensed Energy Systems]. Chernogolovka, Dzerzhinskiy, Institute of Problems of Chemical Physics of RAS Publ., 2016, pp. 231–235.
- [24] Kolganov E.V., Smirnov S.P., Smirnov A.S. Prostyle metody rascheta kharakteristik detonatsii i obshchaya metodologiya razrabotki metodov otsenki parametrov vzryva [Simple methods of computing detonation characteristics and general methodology for developing explosion parameter estimation methods]. *Tr. Mezhdunar. konf. "IX Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya": Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva, detonatsiya, udarnye volny* [Proc. of the International conference 9th Khariton Readings: Extreme states of matter, detonation, shock waves]. Sarov, Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics Publ., 2007, pp. 144–146.
- [25] Barmin A.V., Shkalyabin I.O., Kozhevnikov V.G., Kolganov E.V., Ilin V.P., Imkhovik N.A., Odintsov V.A., Reznichuk I.Yu. *Gorenie i vzryv — Combustion and Explosion*, 2012, vol. 5, no. 5, pp. 373–378.
- [26] Grady D. *Fragmentation of Rings and Shells: The Legacy of N.F. Mott*. Springer, 2006, 376 p.

Barmin A.V., Engineer, JSC State scientific research institute Kristall. Author of 20 scientific publications and inventions in the field of physics of explosion, fracture mechanics, test techniques and foundations of fragmentation munition theory.

Pechenev Yu.G., Cand. Sc. (Eng.), Scientific Director, JSC State scientific research institute Kristall. Author of over 100 scientific publications, two monographs and over 40 patents.

Odintsov V.A., founder of the modern scientific school in the fragmentation munition theory. Author of over 200 scientific publications and over 120 patents, author of the GOST State Standard for standard fragmenting cylinder testing.

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 10 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

Machneva I.P., Cand. Sc. (Eng.), Assoc.Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. Author of 35 scientific publications and 8 inventions in the field of fragmentation munition effect theory, theory of energetic materials, chemical physics of combustion and explosion.