

ОСКОЛОЧНЫЕ СПЕКТРЫ СТАНДАРТНЫХ ЦИЛИНДРОВ RSFC, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ НОВОЙ ВЫСОКООСКОЛОЧНОЙ СТАЛИ 80Г2С

В.А. Одинцов¹, А.В. Бармин², Н.А. Имховик¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

e-mail: imkhovik-n@mail.ru

²ОАО “ГосНИИ “Кристалл”, г. Дзержинск, Нижегородская обл., Россия

Изложены результаты экспериментальных исследований процесса дробления стандартных осколочных цилиндров RSFC закрытого типа № 12, изготовленных штамповкой из высокоосколочной стали 80Г2С. Проведена статистическая обработка осколочных масс, полученных при испытаниях макетов RSFC, снаряженных взрывчатыми составами шести типов. Рассмотрена возможность установления корреляционных зависимостей массово-числовых характеристик осколочного спектра RSFC от свойств ВС: скорости детонации, давления Чепмена–Жуге и скорости расширения оболочки по методике Т-20. Показана перспективность применения эвтектоидной стали 80Г2С в серийном производстве осколочных и осколочно-фугасных снарядов, в том числе при их снаряжении новыми пластизольными взрывчатыми составами, имеющими пониженную чувствительность.

Ключевые слова: высокоосколочная сталь, низкочувствительные взрывчатые вещества, пластизольные взрывчатые составы, осколочный спектр, стандартный осколочный цилиндр, осколочно-фугасный снаряд.

FRAGMENTATION SPECTRA OF RUSSIAN STANDARD FRAGMENTING CYLINDERS MADE OF NEW SPLINTERING 80G2S STEEL

V.A. Odintsov¹, A.V. Barmin², N.A. Imkhovik¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: imkhovik-n@mail.ru

²ОАО “GosNII “Kristall”, Dzerzhinsk, Nizhnii Novgorod, Russia

The results of experimental studies of the process of splitting the Russian standard fragmenting cylinders (RSFC) of closed-type no. 12, made by punching of highly splintering steel 80G2S, are presented. The fragment masses that were obtained from tests of RSFC models filled with explosive materials of six types were statistically processed. The possibility of establishing correlations between the mass-numerical characteristics of the RSFC fragmentation spectra and the explosive material properties (the detonation velocity, the Chapman–Jouguet pressure, and the shell expansion velocity) according to the T-20 technique is shown. The application of the eutectoid 80G2S steel for mass production of the fragmenting and high-explosive shells, including those equipped with new plastisol explosive compounds that have a reduced sensitivity, is shown to be promising.

Keywords: highly splintering steel, low-sensitivity explosive material, plastisol explosive compounds, fragmentation spectrum, standard fragmenting cylinder, high-explosive shell.

Разработка новых взрывчатых составов (ВС) к осколочным боеприпасам (БП) проходит с учетом многих требований, главными из которых являются:

- высокое метательно-дробящее действие;
- низкая чувствительность к внешним воздействиям, в первую очередь к прострелу пульей и осколком;
- невысокая стоимость ВС;
- технологичность процесса изготовления ВС и снаряжения БП.

В настоящее время проблема снижения чувствительности ВС к прострелу пульей и осколком главенствует над всеми остальными. Опыт войн последних лет, в том числе операций на Ближнем Востоке в Ираке и в Афганистане, показал наличие больших потерь при обстреле транспорта с боеприпасами, применении самодельных взрывных устройств, обстреле складов артиллерийских и авиационных БП и т.п.

К решению проблемы безопасности идут путем разработки новых низкочувствительных ВС. Французской фирмой GIAT разработан низкочувствительный состав XF13153 EIDS (Extremely Insensitive Detonation Substance): 30 % ТНТ, 20 % алюминиевой пудры, 10 % парафина и 40 % нитротриазолона, предназначенный для снаряжения 155-мм осколочно-фугасного снаряда (ОФС) LU211 “Мюраг” [1].

Весьма показательным событием был переход в США к тротилу для снаряжения 155-мм ОФС M795, ранее снаряжавшегося составом “В”. Хорошо известно, что переход к низкочувствительным ВС, как правило, приводит к снижению качества дробления. Сохранение высокого осколочного действия в данном случае обеспечивалось за счет замены стали корпуса БП на новую высокоосколочную кремнистомарганцевую сталь HF-1 [2], примерно соответствующую отечественной индексации 110Г2С.

Испытания этой стали проводились в ходе НИР “Инверсия” (1975–1982). Были подтверждены ее высокие осколочные свойства [3], но в то же время отмечена сложность технологического процесса изготовления корпуса.

В 1982 г. Т.Ф. Волыновой и В.А. Одинцовым на основе предложенной ими теории разрушения эвтектоидных сталей была разработана высокоосколочная сталь 80Г2С (0,8 % С, 2 % Mn, 1 % Si). Испытания стали на стандартных осколочных цилиндрах (СОЦ, или RSFC — Russian Standard Fragmenting Cylinder) закрытого типа № 12 при снаряжении составом А-IX-2 подтвердили ее высокие осколочные свойства. Теоретические и методические вопросы применения осколочных цилиндров изложены в работе [3].

Однопараметрический критерий Q_F при содержании С 0,7 % составил 956, при С 0,9 % — 960, что свидетельствует о качественном дроблении [4]. В 1999 г. авторы подали заявку и 20.07.2000 г. получили патент [5]. По этой стали опубликован ряд работ [6–8].

Сталь 80Г2С была применена тульским ГУП “КБП” в конструкции 100-мм снаряда 3ОФ70 “Вишня” нового выстрела 3УОФ19 к пушке 2А70 боевой машины пехоты БМП-3. Снаряд обеспечил получение высококачественного осколочного спектра [9].

Из числа последних событий в этой области отметим разработку в США совместно с компанией BAE Systems нового ВС IMX-101 (Insensitve Munitions Explosive 101, основные компоненты состава — 2,4-динитроанизол и нитротриазолон), предназначенного для снаряжения 155-мм ОФС. Стоимость IMX-101 по данным Пикатинского арсенала выше, чем тротила, однако вскоре может быть снижена за счет начала масштабного серийного производства.

В настоящей статье изложены результаты экспериментальных исследований дробления стандартных осколочных цилиндров № 12, изготовленных из высокоосколочной стали 80Г2С. Стандартный осколочный цилиндр показан на рис. 1, а, схема эксперимента — на рис. 1, б. Пропорции цилиндра RSFC защищены патентом № 2025646 РФ.

Эксперименты проводились в бронеканере ОАО “ГосНИИ “Кристалл”; плавка опытной стали 80Г2С — в ОАО “Завод “Сельмаш” (г. Киров); химический состав стали: 0,85 % С, 1,52 % Мn, 0,85 % Si, 0,23 % Cr, 0,21 % Cu, 0,19 % Ni, 0,015 % P, 0,012 % S). Стандартные цилиндры изготавливались из этой стали методом горячей штамповки с последующей механической обработкой по наружной поверхности. Далее приводятся механические свойства образцов (средние

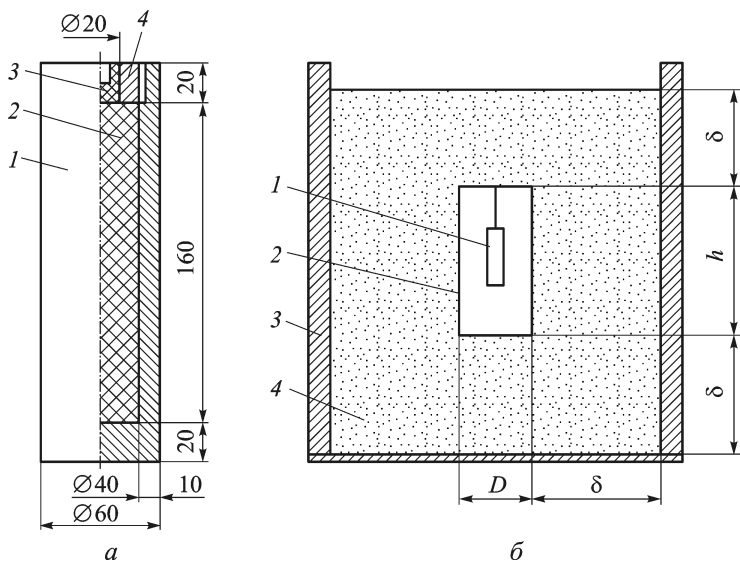


Рис. 1. Стандартный осколочный цилиндр RSFC № 12 закрытого типа (а) и схема проведения эксперимента (б):

а — 1 — корпус; 2 — заряд ВВ; 3 — дополнительный детонатор; 4 — крышка;
 б — 1 — макет; 2 — картонный цилиндр; 3 — хромоникелевый цилиндр (улавливатель);
 4 — древесные опилки

из четырех определений): предел прочности $\sigma_b = 1013$ МПа, предел текучести $\sigma_s = 615$ МПа, относительное сужение $\psi = 0,32$, относительное удлинение $\delta = 0,12$, ударная вязкость $KCU = 0,5$ МДж/м², $KCV = 0,17$ МДж/м².

Испытания в бронекамере проводились для шести типов ВС. Испытывались три штатных состава (ТНТ, А-IX-2, окфол) и три пластизольных состава (ОЛД-20, ОЛА-8, ОЛА-15), имеющих пониженную чувствительность. Наиболее широко применяемой мерой чувствительности ВС является критическое давление $p_{кр}$ на фронте ударной волны в заряде, вызывающее инициирование детонации ВС. К низкочувствительным обычно относят ВС с $p_{кр} \geq 4$ ГПа. Для штатного состава А-IX-2, применяемого для снаряжения отечественных ОФС, $p_{кр} = 2,0 \dots 2,2$ ГПа. Пластизольные составы имеют $p_{кр} = 3,0 \dots 3,4$ ГПа, т.е. они приближаются к низкочувствительным ВС.

Сравнительные результаты испытаний составов в RSFC представлены в табл. 1 и 2. Оценка дробящего действия ВС выполнена на основании подсчета числа осколков различных массовых фракций, собранных во взрывной камере после опыта.

Таблица 1

Характеристики ВС и массово-числовые параметры осколочного спектра

ВС	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	$N_{0,25}$	$N_{0,5}$	$N_{1,0}$	μ_m	μ_c	μ_k	Q_F
ТНТ	1,59	6,89	948	737	536	0,142	0,303	0,555	287
А-IX-2	1,77	8,1	1499	1070	659	0,265	0,422	0,313	632
Окфол	1,77	8,59	1559	1179	752	0,257	0,499	0,244	778
ОЛД-20	1,77	8,43	1829	1251	720	0,356	0,454	0,189	830
ОЛА-8	1,82	8,45	1712	1166	717	0,281	0,502	0,209	859
ОЛА-15	1,82	8,14	1758	1256	770	0,317	0,513	0,170	902

Примечание. ρ_0 — плотность ВС; $N_{0,25}$, $N_{0,5}$, $N_{1,0}$ — соответственно числа осколков с массой более 0,25, 0,5 и 1,0 г; μ_m , μ_c , μ_k — соответственно массовые содержания мелкой ($m \leq 1$ г), средней ($m = 1 \dots 4$ г) и крупной ($m > 4$ г) фракций; Q_F — однопараметрический показатель качества дробления.

Средняя масса цилиндра RSFC № 12 составляет 2570 г. Относительная масса собранных в бронекамере осколков — не менее 0,97 (минимальное требование по ГОСТ — 0,95). В качестве улавливающей среды использовались опилки.

Распределение осколков по массовым группам для штатных ВС приведены в табл. 3.

Распределение осколков по массовым группам для новых пластизольных ВС представлены в табл. 4.

Характеристики формы осколков

ВС	l_{20} , мм	m_{20} , г	λ_{20}	λ_{\max}	l_{\max} , мм	B_{20} , мм ²
ТНТ	51,1	15,325	8,751	12,587	68,55	38,075
А-IX-2	40,96	8,443	8,1311	11,568	60,9	26,211
Окфол	47,85	6,579	11,731	15,257	65,85	18,629
ОЛД-20	43,303	5,5915	11,003	17,21	60,4	16,549
ОЛА-8	50,318	6,4355	12,797	24,132	86,75	16,411
ОЛА-15	37,02	5,4435	8,9148	11,923	46,55	18,662

Примечание. l_{20} — средняя длина осколка в выборке 20 наиболее длинных осколков данного спектра; m_{20} — средняя масса осколка в этой выборке; l_{\max} — максимальная длина осколка; λ_{\max} — максимальное удлинение осколка; λ_{20} — среднее удлинение для выборки 20 наиболее длинных осколков данного спектра; B_{20} — средняя площадь поперечного сечения осколков в этой выборке ($B = V/l$, $V = m/\gamma_0$, где V — объем осколка).

Таблица 3

Распределение осколков по массовым группам для штатных ВС

Δm_i , г	ТНТ		А-IX-2		Окфол	
	N_i , шт.	M_i , г	N_i , шт.	M_i , г	N_i , шт.	M_i , г
Менее 0,25	–	126,71	–	196,61	–	188,9
0,25–0,5	211	75,1	429	155,78	380	137,07
0,5–1,0	201	145,63	411	295,1	427	310,92
1,0–2,0	183	265,95	300	421,49	385	555,3
2,0–3,0	110	272,74	144	351,8	158	383,6
3,0–4,0	68	237,45	89	310,92	98	344,16
4,0–5,0	38	170	53	238,15	55	249,2
5,0–6,0	28	153,3	23	127,12	26	140
6,0–7,0	22	143,11	19	121,56	12	77,7
7,0–8,0	22	167,1	13	98,07	8	59,27
8,0–9,0	12	100,94	1	8,05	3	25,12
9,0–10,0	14	133,3	5	48,15	5	47,45
10,0–12,0	14	152	5	56,74	–	–
12,0–15,0	12	158,8	4	52,53	1	13,1
15,0–20,0	10	172,8	2	34,4	1	16,1
20,0–30,0	3	69,9	1	20,56	–	–
Итого	948	2544,8	1499	2537	1559	2547,9

Примечание. Δm_i , N_i , M_i — интервал, число фрагментов и масса в i -й массовой группе.

В табл. 5 проведено сравнение однопараметрического показателя качества дробления Q_F для штатной снарядной стали С-60 и новой стали 80Г2С.

Распределение осколков по массовым группам для пластизольных ВС

$\Delta m_i, \text{ г}$	ОЛД-20		ОЛА-8		ОЛА-15	
	$N_i, \text{ шт.}$	$M_i, \text{ г}$	$N_i, \text{ шт.}$	$M_i, \text{ г}$	$N_i, \text{ шт.}$	$M_i, \text{ г}$
Менее 0,25	–	270,84	–	208,5	–	232,45
0,25–0,5	578	210,89	546	193	502	179,56
0,5–1,0	531	379,87	449	324,6	486	348,53
1,0–2,0	428	601,2	376	545,4	435	616,6
2,0–3,0	158	377,7	168	467,7	179	439,06
3,0–4,0	56	193,35	83	285,8	76	264,5
4,0–5,0	32	145,96	34	149,3	43	193,22
5,0–6,0	16	87,26	27	150,5	17	91,71
6,0–7,0	12	78,1	15	98,5	7	45,42
7,0–8,0	8	62,2	3	22	6	44,24
8,0–9,0	2	18,94	3	25,8	2	17,04
9,0–10,0	4	37,7	2	18,8	2	19,04
10,0–12	1	11,5	4	44,2	1	10,12
12,0–15	2	27,56	1	12,4	1	12,94
15,0–20	1	18,97	1	18,9	1	15,1
Итого	1829	2522	1712	2565,4	1758	2529,5

Таблица 5

Сравнение характеристик дробления для штатной и новой стали

ВС	Сталь						Отношение показателей Q_F
	С-60			80Г2С			
	$N_{0,25}$	μ_c	Q_F	$N_{0,25}$	μ_c	Q_F	
ТНТ	745	0,221	165	948	0,303	287	1,74
А-IX-2	984	0,304	299	1499	0,422	632	2,11
Окфол	1216	0,390	474	1559	0,499	778	1,64
ОЛД-20	1217	0,375	456	1829	0,454	830	1,82
ОЛА-8	1132	0,347	393	1712	0,502	859	2,18
ОЛА-15	1234	0,375	463	1758	0,513	902	1,95

Очевидно, что переход на сталь 80Г2С обеспечивает существенный прирост показателя Q_F , характеризующего качество дробления. Для штатных составов значение Q_F в среднем возрастает в 1,83 раза, для новых составов — в 1,98 раза, т.е. почти вдвое. Это указывает на несомненную перспективность использования этой стали. На рис. 2 приведено положение точек $N_{0,25} - \mu_c$ на классификационной диаграмме качества дробления стандартного цилиндра № 12.

Отметим, что для всех трех новых составов не достигнуто попадание в зону I высококачественного дробления, хотя для состава ОЛА-15 выполняется на пределе условие высококачественного дроб-

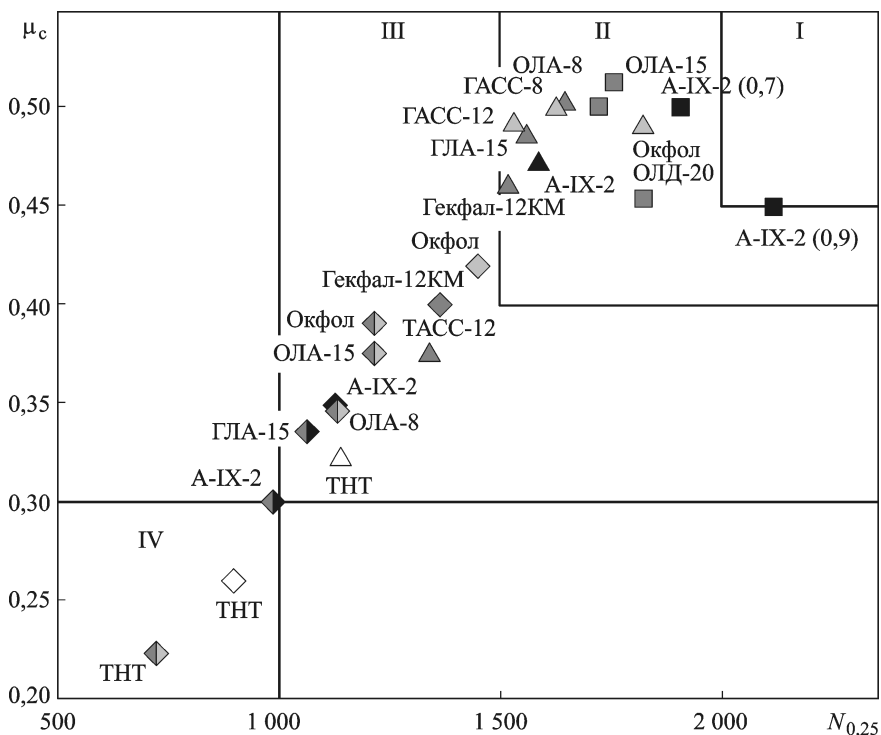


Рис. 2. Классификационная диаграмма качества дробления стандартного осколочного цилиндра № 12:

I, II, III, IV — области высококачественного, качественного, удовлетворительного и неудовлетворительного дробления, соответственно (◇ — штампованный СОЦ (сталь С-60); △ — точеный СОЦ (сталь С-60); □ — штампованный СОЦ (сталь 80Г2С))

ления $Q_F \geq 900$. Отметим также, что для всех трех составов выполняется критическое условие $\mu_c \geq 0,45$ по содержанию средней фракции осколков ($1 < m \leq 4$).

Из табл. 2 следует, что при комбинациях 80Г2С/новые ВС, к сожалению, не устранено саблеобразование, являющееся главным врагом качественных осколочных спектров. Практически для всех новых составов максимальное удлинение осколка превышает $\lambda_{\max} > 12$, т.е. в спектре присутствуют длинные осколки. Согласно принятой в НИР “Инверсия” установке, присутствие в спектре хотя бы одного сверхдлинного осколка указывает на низкие осколочные свойства стали.

Ранее в работе [10] было показано, что характеристики выборки 20 наиболее длинных осколков спектра содержат полезную информацию для отбора комбинаций “металл–ВВ”. Из табл. 2 следует, что для стали 80Г2С также сохраняются достаточно тесные корреляционные связи между этими характеристиками и величинами $N_{0,25}$, μ_c , Q_F . На рис. 3 представлены уравнения регрессии при аргументе m_{20} (средняя масса выборки). Коэффициент корреляции во всех случаях превышает 0,94, т.е. связь близка к функциональной.

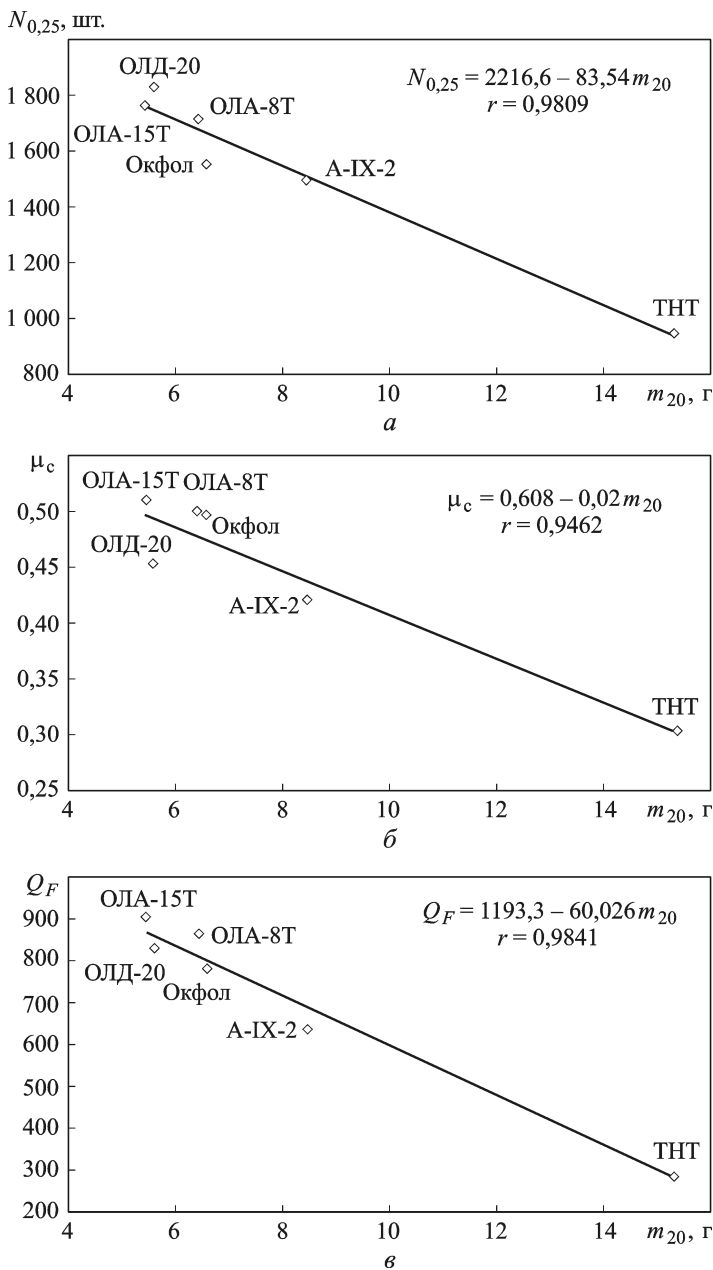


Рис. 3. Уравнения регрессии

На рис. 4 показаны зависимости числа осколков $N_{0,25}$ от характеристик ВС: скорости детонации (D , км/с), давления Чепмена–Жуге (p_{C-J} ГПа) и скорости расширения оболочки по методике Т-20 на радиусе 15 мм (W_{15} , км/с). Во всех трех случаях имеет место тесная корреляционная связь. Наивысший коэффициент корреляции $r = 0,967$ получен для зависимости $W_{15} - N_{0,25}$.

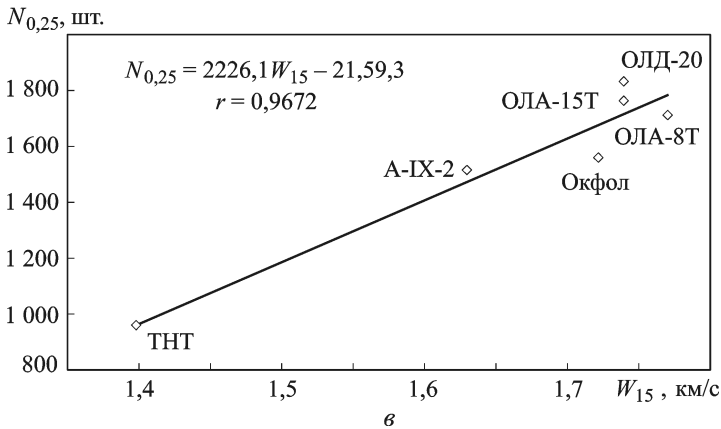
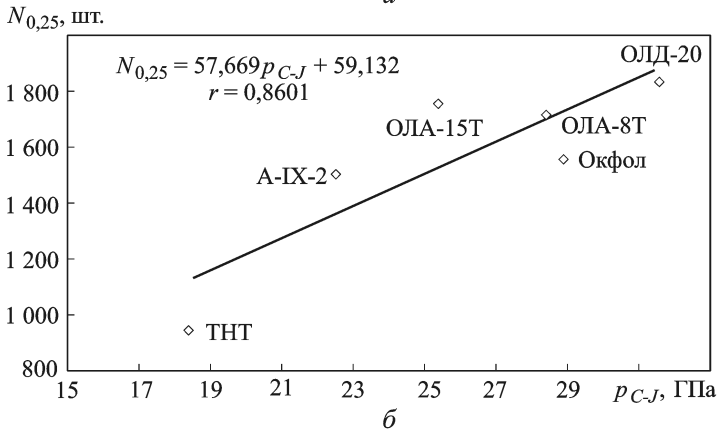
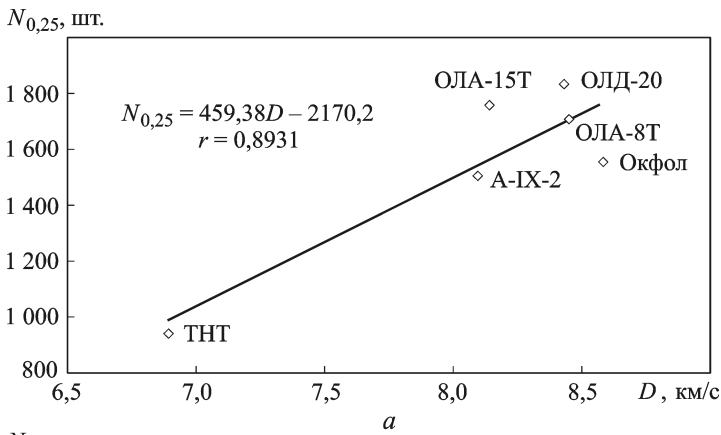


Рис. 4. Зависимости числа осколков $N_{0,25}$ от характеристик ВС:

a — скорости детонации D ; *b* — давления Чепмена-Жуге p_{C-J} (*b*); *v* — скорости расширения оболочки по методике Т-20 W_{15}

На рис. 5 представлены корреляционные зависимости относительной массы средней фракции μ_c от характеристик ВС. Как и в предыдущем случае наиболее тесной является зависимость от величины W_{15} ($r = 0,963$).

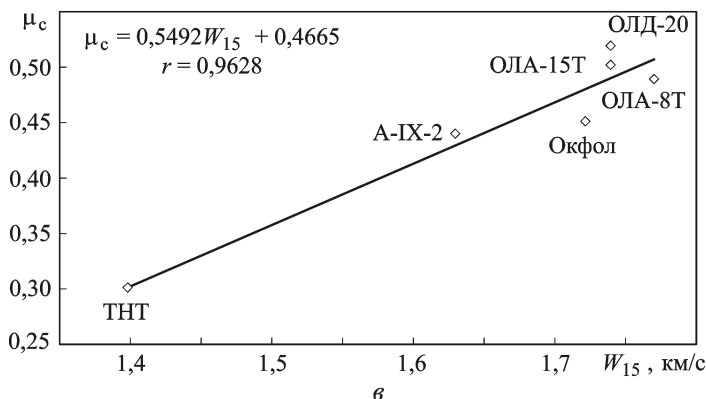
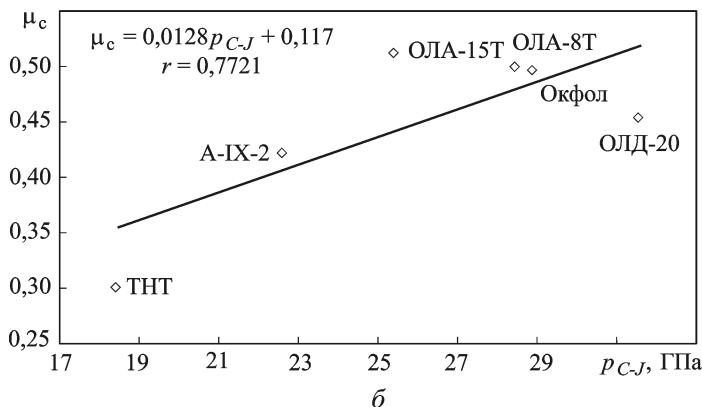
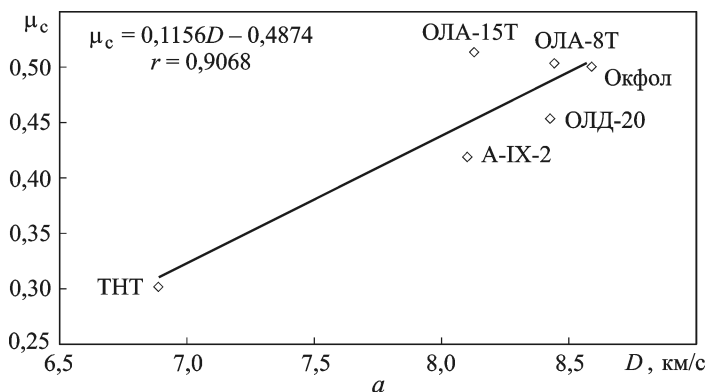


Рис. 5. Зависимости относительной массы средней фракции μ_c от характеристик ВС:

a — скорости детонации D ; b — давления Чепмена-Жуге p_{C-J} ; v — скорости расширения оболочки по методике Т-20 W_{15}

Для новой стали проводился подбор параметров статистической модели распределения осколков по массе. Использовалось как распределение Вейбулла

$$f(m) = \frac{\Lambda}{m_0} \left(\frac{m}{m_0} \right)^{\Lambda-1} e^{-\left(\frac{m}{m_0} \right)^\Lambda}$$

(где m_0 — характеристическая масса распределения; Λ — показатель однородности спектра), так и гиперэкспоненциальная статистическая модель (модель Одинцова–Грэди), плотность распределения в которой имеет вид

$$f(m) = \frac{\xi}{m_a} e^{-\frac{m}{m_a}} + \frac{1-\xi}{m_b} e^{-\frac{m}{m_b}},$$

а математическое ожидание массы осколка определяется по формуле

$$\langle m \rangle = \xi m_a + (1 - \xi) m_b.$$

Подбор параметров ξ , m_a , m_b проводился с использованием критерия χ^2 Пирсона. Оптимальная комбинация m_a, m_b находилась по условию $\chi^2 = \min$:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\kappa} \frac{(N_i - N_i^{(r)})^2}{N_i^{(r)}} = f(\xi, m_a, m_b) = \min,$$

где N_i — число осколков в данной массовой группе, определенное экспериментально; $N_i^{(r)}$ — расчетное число осколков в данной массовой группе при данной гипотезе о распределении; k — число массовых групп ($k = 9$).

Правдоподобие гипотезы проверялось по критерию Романовского

$$R = \frac{\chi^2 - r}{\sqrt{2r}} \leq 3,$$

где $r = k - s - 1$ — число степеней свободы; s — число определяемых параметров распределения ($s = 2$; m_a, m_b).

Ранее в работах [11, 12] аналогичное исследование проводилось для цилиндров, изготовленных из стали С-60. При этом было показано, что параметр ξ может быть принят постоянным и равным 0,5. Гиперэкспоненциальная модель показала существенно бóльшую точность, чем модель Вейбулла.

Результаты для стали 80Г2С приведены в табл. 6 ($\xi = 0,5$).

Таблица 6

Сравнение статистических моделей спектра

ВС	Модель Одинцова–Грэди			Модель Вейбулла		
	m_a , Г	m_b , Г	R	Λ	m_0	R
ТНГ	3,5	0,43	1,6	0,505	0,79	0,45
А-IX-2	1,9	0,32	1,7	0,515	0,42	1,1
Окфол	1,9	0,48	0,054	0,68	0,79	0,1
ОЛД-20	1,4	0,31	5,4	0,575	0,4	0,34
ОЛА-8	1,5	0,24	2,13	0,54	0,39	2,4
ОЛА-15	1,3	0,16	2,2	0,665	0,62	0,48

В целом обе модели удовлетворительно согласуются с экспериментом. Исключение представляет состав ОЛД-20, для которого значение критерия Романовского составило 5,4. Среднее значение критерия Романовского для гиперэкспоненциального распределения осколков стали 80Г2С даже с учетом этого отклонения составило 2,18, что указывает на высокий уровень достоверности модели Одинцова–Грэди.

Выводы. Испытания подтвердили, с одной стороны, перспективность применения эвтектоидной стали 80Г2С в серийном производстве ОФС, а с другой стороны, перспективность новых пластизольных ВС, имеющих пониженную чувствительность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Наседкин В.И., Одинцов В.А.* Штурмовая гаубица Д-395 “Тверь”: новое техническое решение // Оборонная техника. 2004. № 5.
2. *Патент США № 3547032.* Сталь HF-1 (110Г2С). 15 Dec. 1970, F42B, 12/00, 12/76, 102/491.
3. *Физика взрыва: в 2 т. / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др.; под ред. Л.П. Орленко.* Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
4. *Одинцов В.А.* Конструкции осколочных боеприпасов: учеб. пособие. Ч. 2. Артиллерийские снаряды. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
5. *Патент РФ № 2153024.* Высокоосколочная сталь для изготовления корпусов осколочных боеприпасов, корпус и боеприпас. F42B, 12/74, С. 22, С. 38/04.
6. *Волынова Т.Ф., Одинцов В.А.* Высокоосколочная эвтектоидная сталь 80Г2С // Оборонная техника. 2000. № 1–2.
7. *Одинцов В.А.* Высокоосколочные стали // Вооружение. Политика. Конверсия. 2001. № 3.
8. *Волынова Т.Ф., Одинцов В.А.* Характеристики формы осколков из стали 80Г2С // Боеприпасы. 2000. № 3.
9. *Осипова Л., Парфенов Д., Никифоров В.* Модернизация 100-мм выстрелов с ОФС для объектов бронетанковой техники // Обзорение армии и флота. 2007. № 2.
10. *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.
11. *Испытания новых алюминизированных взрывчатых составов в стандартном осколочном цилиндре RSFC № 12 / А.В. Бармин, Ю.Г. Печенев, А.Г. Карачев и др.* // Вооружение. Политика. Конверсия. 2012. № 1.
12. *Использование гиперэкспоненциального распределения для описания осколочных спектров стандартных цилиндров RSFC № 12, снаряженных новыми алюминизированными ВВ / А.В. Бармин, И.О. Шкалябин, В.Г. Кожевников и др.* // Вопросы оборонной техники. Сер. 14. Проектирование систем вооружения, боеприпасов и измерительных комплексов. 2012. Вып. 2. С. 65–72.

Статья поступила в редакцию 27.11.2012