

ДРОБЯЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ СМЕСЕВЫХ ВВ В УНИФИЦИРОВАННЫХ ЦИЛИНДРАХ

Использование унифицированных цилиндров при испытаниях дробящего действия ВВ позволило получить достаточно детальную картину изменения характеристик дробления в зависимости от свойств металла и ВВ [1—4]. При этом при широкой номенклатуре типов сталей (низко-, средне- и высокоуглеродистых) использовались в основном только три типа ВВ: ТНТ, гексоген — алюминий флегматизированный и октоген флегматизированный. В настоящей статье исследуется дробящее действие смесевых составов, включающих ВВ, окислитель (перхлорат калия) и горючее (алюминиевая пудра).

Для испытаний использовался унифицированный цилиндр № 12 со следующими размерами: внутренний диаметр $d = 40$ мм, длина камеры $L_0 = 160$ мм (удлинение камеры $\lambda_0 = L_0/d = 4$), толщина стенки $\delta_0 = 10$ мм, наружный диаметр $d_0 = 60$ мм (относительная толщина стенки $\delta_d = \frac{\delta_0}{d_0} = 1/6$), толщина доньев 20 мм, масса цилиндра 2660 г. Цилиндры изготовлены механической обработкой из нормализованной Ст. 60. Испытания проводились подрывом в опилочной камере при диаметре полости улавливателя 360 мм ($6 d_0$). Для каждого состава проводилось два подрыва. Определялись следующие характеристики осколочных масс: числа осколков с массой $m > 0,25, 0,5$ и 1 г ($N_{0,25}, N_{0,5}, N_{1,0}$), коэффициент вариации числа $\frac{N_{0,25}}{N_{0,25}} V_N = \hat{s}/\bar{N}_{0,25}$ (\hat{s} — выборочное среднее квадратическое отклонение, $\bar{N}_{0,25}$ — среднее значение), μ_m, μ_c, μ_k — относительные содержания мелкой ($m \leq 1$ г), средней ($1 < m \leq 4$ г) и крупной фракций осколков ($m > 4$ г). Определялись также следующие морфологические характеристики осколков: максимальная длина в спектре l_{\max} и соответствующее относительное удлинение $\lambda = \sqrt{\gamma_0^3/m}$ (γ_0 — плотность металла), а также для выборки 20 наиболее длинных осколков — средняя длина l_{20} и площадь поперечного сечения осколка Ψ_{20} . Исходные характеристики составов и результаты экспериментов представлены в таблице, где Q_v — удельная теплота взрыва; α — кислородный коэффициент.

Для величин $\bar{N}_{0,25}, \mu_c, V_N, l_{\max}, \Psi_{20}$ строились корреляционные зависимости их от скорости детонации D . Они имеют следующий вид (r — коэффициент корреляции):

$$\begin{aligned} N_{0,25} &= -1481,2 + 0,375D, & r &= 0,85; \\ \mu_c &= -0,307 + 9,5 \cdot 10^{-5}D, & r &= 0,998; \\ V_N &= 0,88 - 1,0 \cdot 10^{-4}D, & r &= 0,92; \\ l_{\max} &= 383,2 - 0,039D, & r &= 0,81; \\ \Psi_{20} &= 111,8 - 0,011D, & r &= 0,96. \end{aligned}$$

Строились также корреляционные зависимости указанных величин от параметра $\rho_0 D^2$, но оказалось, что они более слабые (значения коэффициента корреляции составили соответственно 0,75, 0,75, -0,8, -0,69 и -0,78).

Для всех исследуемых составов $N_{0,25} = 1470 \div 1820$. Для среднеуглеродистой нормализованной Ст. 60 это достаточно высокий показатель. Более высокие значения $\bar{N}_{0,25}$ в настоящее время могут быть получены только за счет использования охрупченных сталей, например высокоуглеродистой кремнемарганцевой стали HF-1 [5], бористой стали [6], кремнистой стали AISI-9260 и т.п. Общая классификация качества дробления для цилиндра

Номер соот- вет- ствует точ- кам на рис. 1	Смесевое ВВ		Исходные характеристики				Результаты экспериментов									
	Состав	$\rho_0, \text{г/см}^3$	$D, \text{м/с}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ $Q_{\text{в}}$	α	$N_{0,25}$	$N_{0,5}$	$N_{1,0}$	V_N	μ_M	μ_c	μ_k	l_{max} мм	$\lambda_{l_{\text{max}}}$	l_{20} мм	Ψ_{20} мм ²
1	Гексоген флегматизированный	1,65	8300	1190	0,531	1540	1100	710	0,056	0,30	0,48	0,22	48,1	14,0	41,6	18,0
2	Гексоген — алюминий флегматизированный	1,81	8200	1565	0,413	1560	1100	740	0,059	0,24	0,47	0,29	61,3	11,7	41,0	21,1
3	Гексоген — перхлорат калия — алюминий флегматизированный	1,78	7800	1570	0,497	1470	1080	680	0,107	0,24	0,43	0,33	88,9	17,5	40,7	24,2
4	Октоген флегматизированный	1,73	8450	1215	0,559	1820	1200	740	0,042	0,33	0,49	0,18	57,0	14,0	44,2	18,1
5	Октоген — алюминий флегматизированный	1,91	7900	1750	0,370	1560	1150	705	0,098	0,29	0,44	0,27	56,0	10,0	43,1	24,3
6	Октоген — перхлорат калия — алюминий флегматизированный	1,85	8100	1750	0,432	1480	1080	690	0,040	0,26	0,46	0,28	71,7	17,0	43,8	23,4

№ 12 в широком диапазоне свойств сталей и ВВ, согласно [1], следующая: $N_{0,25} \leq 1000$ — дробление неудовлетворительное, $1000 < N_{0,25} \leq 2000$ — дробление удовлетворительное, $N_{0,25} > 2000$ — дробление хорошее.

Согласно [1], теоретическая оценка для $N_{0,25}^{\text{max}}$ осколков цилиндра № 12 составляет ≈ 3000 , максимальное значение, полученное экспериментально, $N_{0,25} = 2400$ (высокоуглеродистая сталь — флегматизированный октоген). Величина $N_{0,25}$ линейно возрастает с увеличением скорости детонации D , коэффициент вариации V_N линейно убывает (рис. 1). Последнее указывает на то, что с увеличением интенсивности нагрузки процесс дробления становится более стабильным. Величины $N_{0,5}$ и $N_{1,0}$ также монотонно возрастают вместе с D . Отношения $N_{0,5}/N_{0,25}$ и $N_{1,0}/N_{0,25}$ изменяются в небольших пределах и в среднем составляют соответственно 0,71 и 0,45.

Фракционный состав осколочной массы также зависит от скорости детонации. Наиболее тесным образом скорость детонации влияет на относительное содержание средней фракции μ_c (см. рис. 1). Эта связь близка к функциональной ($r = 0,998$). Величина μ_c — важнейший показатель качества дробления. С увеличением μ_c качество дробления улучшается, т.е. дробление приближается к заданному. Взаимосвязь μ_M и μ_c представлена на рис. 2 с помощью треугольной фракционной диаграммы Розебома. Линией нанесена расчетная зависимость $\mu_c = f(\mu_M)$ для бимодальных гиперэкспоненциальных спектров [4, 7]:

$$f(m) = \frac{\xi}{m_A} \exp\left(-\frac{m}{m_A}\right) + \frac{1-\xi}{m_B} \exp\left(-\frac{m}{m_B}\right),$$

где m_A, m_B — соответствующие массовые характеристики осколков типа А (крупных, содержащих обе исходные поверхности цилиндра) и типа В (мелких, содержащих одну исходную поверхность цилиндра); ξ —

Рис. 1.

относительное число осколков типа A .

Переход к распределению $\varphi(m)$ (масса по массе) производится с помощью соотношения

$$\varphi(m) = \frac{m}{\langle m \rangle} f(m).$$

Здесь $\langle m \rangle = \xi m_A + (1 - \xi) m_B$ — математическое ожидание массы осколка. Кривая построена при $\xi = 0,2$, $\mu = m_B/m_A = 0,05$. На кривой нанесены расчетные точки, соответствующие различным значениям m_A . На восходящей ветви кривой содержание мелкой и средней фракций одновременно возрастает за счет уменьшения крупной фракции. На нисходящей ветви крупная фракция практически исчерпана, и содержание мелкой фракции возрастает за счет уменьшения средней фракции.

Расположение всех экспериментальных точек для исследуемых смесевых ВВ у вершины кривой указывает на то, что составы осколочных масс близки к оптимальным. Максимальное значение $\mu_c = 0,49$ (флегматизированный октоген). На восходящей ветви кривой нанесены также ранее полученные экспериментальные точки для цилиндров № 12 из Ст. 20 (1 — ТНТ, 2 — гексоген — алюминий флегматизированный) и Ст. 45Х (3 — ТНТ, 4 — гексоген — алюминий флегматизированный), а на нисходящей ветви — экспериментальные точки для высокоуглеродистой стали по данным [1] (5 — ТНТ, 6 — гексоген — алюминий флегматизированный, 7 — октоген флегматизированный).

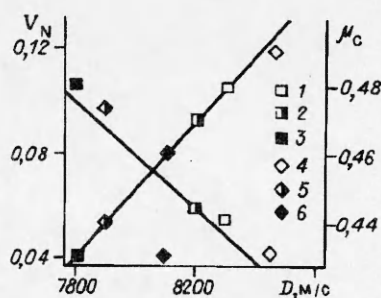
Образование осколков при нагружении смесевыми ВВ происходило по схеме, характерной для среднеуглеродистых сталей: хрупкий отрыв радиального направления во внешней зоне стенки — разрушение сдвигом по плоскостям скольжения во внутренней (контактной) зоне стенки. Максимальные длины осколков для всех составов изменялись в диапазоне 48—89 мм, а удлинения — в диапазоне 10—17,5. Наличие в спектре сверхдлинных осколков с удлинением $\lambda > 15$ [8] указывает на сравнительно низкогокачественный характер дробления Ст. 60. Максимальная длина осколка l_{\max} стабильно убывает с ростом скорости детонации ($r = 0,81$).

Средняя площадь поперечного сечения осколка $\Psi_{20} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \frac{m_i}{\gamma_{0i} l_i}$ для выборки 20 наиболее длинных осколков колеблется в довольно узких пределах и составляет в среднем $21,5 \text{ мм}^2$. Убывание Ψ_{20} с ростом скорости детонации D описывается линейной зависимостью, близкой к функциональной ($r = 0,96$) (рис. 3). Число окружных делений n_θ на осколки типа A определится соотношением

$$n_\theta = S_0 \sigma_A / \Psi_{20},$$

где S_0 — площадь кольцевого сечения цилиндра (для цилиндра № 12 $S_0 = 1570 \text{ мм}^2$); σ_A — доля площади сечения, образованной осколками типа A (для Ст. 60 $\sigma_A \approx 0,6$). Отсюда получаем $n_\theta = 44$. Это значение с достаточным приближением равно числу n_θ , определенному с помощью выкладки осколков на площадь развертки боковой поверхности цилиндра и с помощью высокоскоростной съемки.

Таким образом, для исследованных смесевых ВВ большинство характеристик дробления, в первую очередь число осколков $N_{0,25}$ и содержание средней фракции μ_c , связано достаточно тесными линейными корреляционными зависимостями со скоростью детонации. Одна из возможных



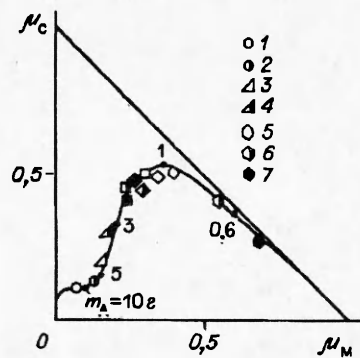


Рис. 2

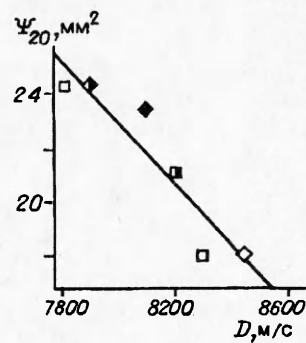


Рис. 3

объяснений этого факта состоит в том, что основная характеристика, определяющая процесс дробления цилиндра — число n_θ окружных делений на крупные осколки типа А, теоретически линейно зависит от скорости детонации. Этот вывод можно получить, используя известные соотношения: формулу Покровского — Мотта для числа окружных делений $n_\theta = 2\pi v_0 / v_*$ (v_0 — радиальная скорость стенки цилиндра в конце разгона, v_* — модуль критической векторной разности скоростей на концах осколка) и формулу Станюковича — Джерни для начальной скорости осколков $v_0 = \frac{D}{2\sqrt{2}} \sqrt{\beta}$ (β — отношение массы ВВ к массе цилиндра), что приводит к выражению

$$n_\theta = BD,$$

$$B = \pi \sqrt{\beta} / v_* \sqrt{2}.$$

С другой стороны, наличие непосредственной связи скорости детонации с характеристиками дробления цилиндров может быть объяснено влиянием ее как кинематического параметра, определяющего процесс накопления разрушения в зоне, расположенной между фронтом детонации и фронтом магистральных трещин, движущимся в общем случае со скоростью $v_c < D$ [1, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Одинцов В.А. Моделирование процессов фрагментации с помощью унифицированных цилиндров: Метод. указания. — М.: Изд-во МГТУ, 1991. — 60 с.
2. Одинцов В.А. Масштабный эффект при разрушении цилиндров // Динамическая прочность и трещиностойкость конструкционных материалов / Под. ред. Г.В. Степанова. — Киев: Институт проблем прочности АН УССР, 1986. — С. 274—282.
3. Одинцова В.А. Разрушение цилиндра как марковский случайный процесс // Тр. МГТУ. — 1992. — № 557. — С. 41—58.
4. Одинцов В.А. Гиперэкспоненциальные спектры взрывного разрушения металлических цилиндров // Изв. РАН: МГТ. — 1992. — № 5. — С. 48—55.
5. Пат. 3547032 США / P.J. Horvath. — 1979.
6. Пат. 3880081 США / P.V. Riffin, E.N. Kinas. — 1975.
7. Одинцов В.А. Бимодальное распределение фрагментов цилиндров // ФГВ. — 1991. — 27. № 5. — С. 118—122.
8. Одинцов В.А. Механика импульсного разрушения цилиндров // Вопросы физики взрыва и удара: сб. статей МВТУ. — М., 1980. — Вып. 1. — С. 22—70.

107005, г. Москва,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию 23/XII 1992, /
после доработки — 8/XII 1993