

ОСКОЛОЧНЫЕ СПЕКТРЫ ЦИЛИНДРОВ, РАЗРУШАЕМЫХ УДАРОМ ТРУБКИ ИЗНУТРИ

УДК 539.4

В. А. Одинцов, И. О. Шкалябин

НИИ специального машиностроения, 107005 Москва

Изложены результаты экспериментальных исследований по разрушению стальных цилиндров ударом трубки изнутри. Образующийся осколочный спектр состоит из двух частей — осколков откольного слоя и более крупных осколков внутреннего слоя. Отмечены значительные удлинения осколков откольного слоя. Общее число осколков 450–600, что соизмеримо с количеством осколков, полученным при заполнении зарядом взрывчатого вещества всего внутреннего объема цилиндра. При этом масса наиболее крупного осколка составляет около 5% массы цилиндра.

В ряде технических приложений необходимо разрушение толстостенного цилиндрического контейнера после выброса его содержимого в осевом направлении. Одно из возможных решений проблемы заключается в размещении по оси цилиндра металлической трубки с зарядом взрывчатого вещества (ВВ), наносящей удар по внутренней поверхности цилиндра, что приводит к его разрушению. Относительный объем трубки в полости цилиндра, как правило, не должен превышать некоторого предельного значения $\bar{V}_{кр}$; в зависимости от условий функционирования конструкции $\bar{V}_{кр} = 0,2 \div 0,4$. При этом должно быть обеспечено достаточно интенсивное дробление цилиндра:

$$\mu \geq \frac{m_{\max}}{M_0} \quad (1)$$

(где m_{\max} — максимальная масса осколка в спектре; M_0 — масса цилиндра (например, $\mu = 0,05$)) — или условие $N_s \geq N_s^*$ (N_s — число осколков с массой, большей m_s).

На рис. 1 представлена исходная конфигурация цилиндра 1 с ударной трубкой 2, заполненной зарядом ВВ 3. Характер разрушения при данной схеме нагружения существенно иной, чем в случае разрушения цилиндра зарядом ВВ, заполняющим весь внутренний объем. Определяющим процессом здесь является кольцевой откол внешнего слоя толщиной h_w (штриховая линия). На рис. 1 S_w , S_i — площади сечений соответственно откольного и внутреннего слоев; S_0 — площадь кольцевого сечения цилиндра ($S_0 = S_w + S_i = (\pi/4)(d_0^2 - d_a^2)$).

Экспериментальные исследования проводились на стальных цилиндрах открытого типа с внутренним диаметром d_a и относительной толщиной стенки $\delta_d = \delta_0/d_0$, соответствующими пропорциям стандартного осколочного цилиндра ($d_a = 40$ и 50 мм, $\delta_d = 1/6$). Цилиндры изготовлены механической обработкой из нормализованной стали 60. Трубка 2 с размерами, принятыми в методе «цилиндр — тест» ($d_0^* = 24$ мм, $d_a^* = 20$ мм, $\Delta_0 = 2$ мм), выполнена из меди М1 и снаряжена флегматизированным октогеном плотностью $\rho_0 = 1,77$ г/см³. Инициирование заряда трубки проводилось плосковолновым генератором. Ранее [1] оптической покадровой схемой было показано, что трубка при расширении сохраняет сплошность до относительного радиуса $b = b/b_0 = 3-4$. Изменение скорости

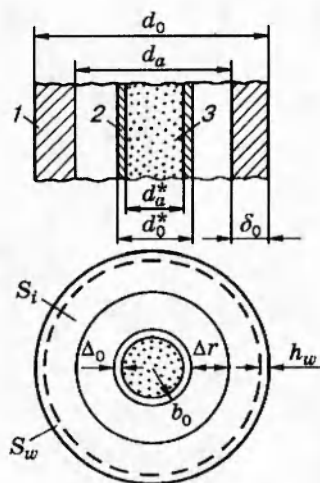


Рис. 1

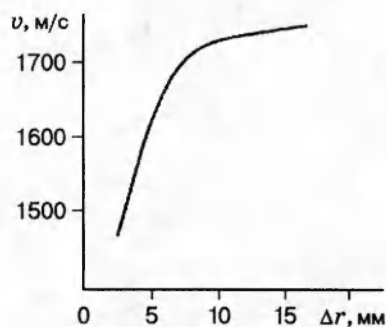


Рис. 2

Таблица 1

d_a , мм	d_0 , мм	δ_0 , мм	S_0 , мм ²	L_0 , мм	M_0 , г	\bar{V}	Δr , мм	b_c	Δ_c , мм	V_c , м/с
40	60	10	1570	180	2120	0,36	8	1,67	1,13	1710
50	75	12,5	2450	200	3820	0,23	13	2,08	0,90	1740

внешней поверхности трубки, определенной щелевой съемкой, приведено на рис. 2.

В табл. 1 представлены размеры цилиндров и другие характеристики опытов, где L_0 , M_0 — длина и масса цилиндра, Δr — величина зазора между трубкой и цилиндром, v_c — скорость внешней поверхности трубки в момент удара о внутреннюю поверхность цилиндра, Δ_c — расчетная толщина трубки в момент удара, определенная в предположении о несжимаемости материала трубки по соотношению

$$\Delta_c = \Delta_0 \frac{b_c - \sqrt{b_c^2 - 4S_w(1 - \delta_d)}}{2\delta_d},$$

где $\delta_d = 1/12$.

При анализе осколочных масс установлено, что для каждого типа цилиндра толщина откольного слоя h_w примерно постоянна по всей длине цилиндра и в среднем составляет 3,0 и 2,7 мм для цилиндров с $d_a = 40$ и 50 мм соответственно. При этом $h_w/\Delta_c = 2,66$ и 3,0, $S_w = 537$ и 613 мм, расчетная относительная масса откольного слоя 0,342 и 0,250 соответственно. Поверхность откола шероховатая. Ранее [1] в опытах с ударником той же конфигурации, но с более тонкими цилиндрами отмечалось возникновение гладких фазовых отколов. Отделившийся откольный слой разрушается продольными хрупкими трещинами отрыва радиального направления с образованием очень длинных осколков. Внутренний слой при $d_a = 40$ мм разрушается сдвигом, при $d_a = 50$ мм — по комбинированной схеме отрыв — сдвиг.

В результате удара трубки внутренняя поверхность цилиндра плакирована медью. Следы меди наблюдаются на сдвиговых поверхностях осколков и даже на внутренней поверхности осколков откольного слоя. На отдельных участках внутренней поверхности

Таблица 2

d_a , мм	$N_{0,25}$	$N_{0,25}^{(w)}$	$N_{0,25}^{(i)}$	N_m	$N_m^{(w)}$	$N_m^{(i)}$	N_c	$N_c^{(w)}$	$N_c^{(i)}$	N_k	$N_k^{(w)}$	$N_k^{(i)}$
40	596	386	213	272	194	78	218	149	69	106	40	66
50	445	225	190	175	91	84	138	88	50	132	76	56

Окончание табл. 2

$\Sigma m^{(w)}$, г	$\mu^{(w)}$	μ_m	$\mu_m^{(w)}$	$\mu_m^{(i)}$	μ_c	$\mu_c^{(w)}$	$\mu_c^{(i)}$	μ_k	$\mu_k^{(w)}$	$\mu_k^{(i)}$
680	0,293	0,063	0,045	0,018	0,191	0,130	0,061	0,680	0,118	0,562
884	0,231	0,021	0,011	0,01	0,074	0,047	0,027	0,815	0,173	0,642

Примечание. N — число осколков; нижние индексы: 0,25 — масса 0,25 г, м — мелкая ($0,25 < m \leq 1$ г), с — средняя ($1 < m \leq 4$ г), к — крупная ($m > 4$ г) фракции; верхние индексы: w — откольные, i — внутренние осколки. Аналогичная система обозначений принята для относительных масс этих фракций.

цилиндра сохраняются приваренные взрывом куски медной трубки. Заметного утонения внутреннего слоя не отмечено.

В табл. 2 приведены характеристики полученных осколочных спектров.

На рис. 3 представлено соотношение осколков в малой, средней и крупной фракциях (соответственно обозначено м, с, к) для цилиндров $d_a = 40$ (а) и 50 мм (б). Высота заштрихованной части столбцов соответствует числу осколков внутреннего слоя $N^{(i)}$, высота незаштрихованной части — числу осколков откольного слоя $N^{(w)}$. Аналогичное построение для относительных масс дано на рис. 4.

Как и следовало ожидать, дробление ударной трубкой имеет значительно менее интенсивный характер по сравнению с дроблением при обычной схеме нагружения (с зарядом ВВ, заполняющим весь внутренний объем цилиндра). Это хорошо видно по большой относительной массе крупной фракции μ_k (для $d_a = 40$ и 50 мм $\mu_k = 0,680$ и $0,815$ соответственно) и по небольшому общему числу осколков (соответственно 596 и 445). Для сравнения укажем, что стандартный осколочный цилиндр № 12 из Ст.60, имеющий размеры, соответствующие испытываемому цилиндру $d_a = 40$ мм, при снаряжении ТНТ, А-IX-2 и флегматизированным октогеном дает значения $\mu_k = 0,60, 0,50, 0,35$ и $N_{0,25} = 1000, 1200,$

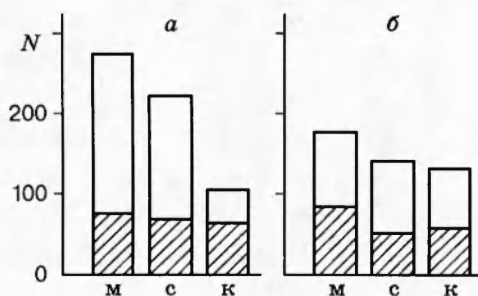


Рис. 3

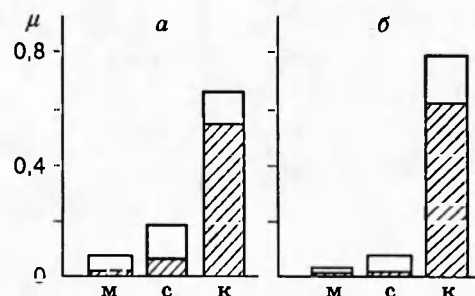


Рис. 4

Таблица 3

d_a , мм	Осколки откольного слоя							
	m , г	l , мм	m' , г/см	$\bar{\Psi}$, мм ²	λ	V_l	V_Ψ	n_θ
40	7,68	72,6	1,06	13,5	20,1	0,32	0,25	40
50	12,5	89,5	1,40	17,8	21,7	0,39	0,44	34
d_a , мм	Осколки внутреннего слоя							
	m , г	l , мм	\bar{m}' , г/см	$\bar{\Psi}$, мм ²	λ	V_l	V_Ψ	n_θ
40	33,3	60,8	5,48	69,8	7,7	0,40	0,41	15
50	73,7	66,8	11,0	140	5,8	0,58	0,42	13

1500 соответственно [2]. В то же время дробление трубкой в целом достаточно мощное и по своим характеристикам примерно соответствует дроблению по обычной схеме нагружения при сочетании низкоуглеродистая сталь — низкобрызганное ВВ (для цилиндра № 12 (Ст.20/ТНТ) $\mu_k = 0,834$, $N_{0,25} = 550$).

Большая часть осколков формируется из откольного слоя (для цилиндров $d_a = 40$ и 50 мм значения $N_{0,25}^{(w)}/N_{0,25} = 0,64$ и $0,57$ соответственно) при сравнительно небольшой относительной массе $\mu^{(w)}$ этого слоя.

Структура осколочных спектров отчетливо прослеживается на рис. 3, 4. В случае $d_a = 40$ мм осколки мелкой и средней фракций формируются в основном из откольного слоя, осколки крупной фракции — в основном из внутреннего слоя. Для цилиндра $d_a = 50$ мм преимущественно откольное происхождение имеют только осколки средней фракции, а осколков мелкой и крупной фракций поровну (количественно) между откольными и внутренними.

Относительные массы собранных осколков откольных слоев меньше значений, рассчитанных по толщине откола, ввиду того, что часть осколков откольных слоев по своей массе находится ниже границы сбора $m_s = 0,25$ г. Соответствующее отношение для цилиндров $d_a = 40$ и 50 мм составляет $0,86$ и $0,93$.

Морфологические характеристики откольных и внутренних осколков определялись по выборке 30 наиболее длинных осколков каждого типа. Для каждого осколка определялись масса m и длина l , а затем рассчитывались масса на единицу длины $m' = m/l$, средняя площадь поперечного сечения $\bar{\Psi} = m'/\gamma_0$, относительное удлинение $\lambda = l/\sqrt{\bar{\Psi}} = \sqrt{\gamma_0 l^3/m}$, а также средние значения этих величин \bar{m} , \bar{l} , \bar{m}' , $\bar{\Psi}$, $\bar{\lambda}$ для выборки, коэффициенты вариации длины и средней площади поперечного сечения $V_l = \sqrt{D_l}/\bar{l}$, $V_\Psi = \sqrt{D_\Psi}/\bar{\Psi}$ (D_l , D_Ψ — дисперсии распределений), число окружных делений $n_\theta = S/\bar{\Psi}$ (с округлением до целого числа). Результаты измерений представлены в табл. 3.

Обращает на себя внимание значительное различие чисел окружных делений в слоях (в откольном слое число n_θ примерно в 2,6 раза выше), что объясняется разными радиальными скоростями слоев. Отношение средних значений осколков внутреннего и откольного слоев $\bar{\Psi} = 5,2$ и $7,9$ для цилиндров с внутренним диаметром $d_a = 40$ и 50 мм соответственно.

Коэффициенты вариации по Ψ и l для осколков данного слоя данного цилиндра близки друг к другу. Для осколков внутреннего слоя они во всех случаях выше, чем для осколков откольного слоя (в среднем в 1,4 раза). Коэффициент вариации также стабильно увеличи-

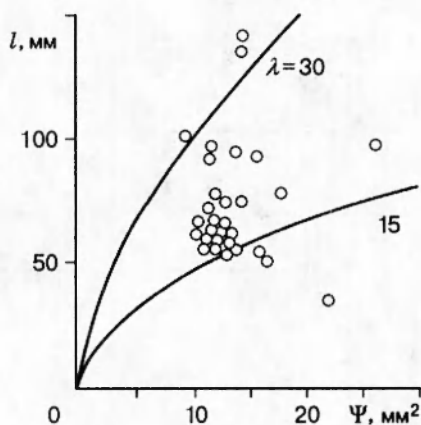


Рис. 5

вается при переходе d_a от 40 к 50 мм (в 1,2–1,75 раза). Наибольшие значения коэффициента вариации $V_l = 0,58$ имеют место для осколков внутреннего слоя при $d_a = 50$ мм, что существенно выше обычных ($V_l = 0,20$ – $0,30$) для выборок такого объема. Это указывает на значительную неоднородность соответствующей части спектра.

Одним из наиболее интересных замеченных фактов является очень большое значение удлинений λ осколков откольного слоя. Для обоих цилиндров значение λ превышало 20, а максимальное удлинение составило $\lambda = 37$. В обычных спектрах такие значения никогда не достигались. Причиной этого, по-видимому, является более однородное дробление, чем в случае разрушения монолитным зарядом. Действительно, в последнем случае разрушение цилиндра осуществляется двумя системами трещин. Это направленные по радиусу трещины хрупкого отрыва во внешней части стенки и сдвиговые трещины во внутренней. Взаимодействие этих систем трещин можно рассматривать как суперпозицию двух пуассоновских потоков с интенсивностями I_1, I_2 соответственно. В результате возникает новый пуассоновский поток с интенсивностью $I_s = I_1 + I_2$, что и приводит к более интенсивному дроблению осколков по длине. При нагружении ударом трубки разрушение осуществляется только радиальными хрупкими трещинами отрыва.

Выборка параметров Ψ, l для осколков откольного слоя цилиндра $d_a = 40$ мм представлена на рис. 5. Согласно [3] осколки с удлинением $\lambda > 15$ относятся к категории сверхдлинных ($4 < \lambda \leq 8$ — нормальные, $8 < \lambda \leq 15$ — длинные). Основная часть экспериментальных точек располагается выше кривой, соответствующей $\lambda = 15$. Точки расположены достаточно компактно, о чем также свидетельствуют невысокие значения коэффициентов вариации ($V_l = 0,32$; $V_\Psi = 0,25$).

Значение коэффициента корреляции равно 0,05, что указывает на независимость

Таблица 4

d_a , мм	m , г	l , мм	m' , г/см	Ψ , мм ²	l/L_0	m/M_0
40	140	98	14,3	182	0,54	0,060
50	209	190	11,0	140	0,95	0,055

Примечание. l/L_0 — отношение длины осколка к длине цилиндра.

компонент случайного вектора (Ψ , l). Поперечное сечение осколков близко по форме к прямоугольнику с отношением сторон 3:4, при этом относительный периметр сечения $\Omega = P/\sqrt{\Psi} = 4,5$ (P — периметр сечения). Среднее значение параметра формы осколка $\Phi = (2 + \Omega\lambda)/4\lambda^{2/3}$ составляет 3,12.

Характеристики осколков максимальной массы приведены в табл. 4.

При $d_a=50$ мм осколок представляет так называемую «полосу» (его длина равна длине цилиндра). При данных пропорциях цилиндров и трубки относительные массы максимальных осколков на пределе удовлетворяют условию (1) при $\mu = 0,05$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грязнов Е. Ф., Одинцов В. А., Селиванов В. В. Гладкие кольцевые отколы // Изв. АН СССР, МТТ. 1976. № 6. С. 148–153.
2. Одинцов В. А. Моделирование процессо-фрагментации с помощью унифицированных цилиндров. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991.
3. Одинцов В. А. Механика импульсного разрушения цилиндров // Вопросы физики взрыва и удара: Сб. статей МВТУ. 1980. Вып. 1. С. 22–70.
4. Одинцов В. А. Двумерное распределение осколков цилиндров по массе и характеристике формы // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 1. С. 129–133.

Поступила в редакцию 19/V 1994 г.
