

Иными словами, давление в ПД есть функция только угла поворота потока β . Это утверждение становится очевидным, если криволинейную поверхность разгоняемой пластины мысленно представить в виде совокупности прямолинейных отрезков (ломаная линия). На каждом стыке отрезков (изломе) поворот потока ПД описывается центрированной волной разрежения, а вдоль отрезка имеет место плоскопараллельное течение. Таким образом, вместо поворота потока на некоторый угол β в одной центрированной волне разрежения этот же поворот можно осуществить в серии центрированных волн на изломах ломаной линии. Давление же в ПД после поворота потока на один и тот же угол в серии волн и в одной волне будет одинаковым. Если теперь длину отрезков устремить к нулю (увеличивая их число), то давление в ПД при повороте на некоторый угол от этого дробления зависеть не будет. Следовательно, и в предельном переходе ломаной линии в кривую, описывающую поверхность пластины при разгоне, давление в ПД не изменится. Этот факт приводит к тому, что при очень толстом заряде, независимо от того, имеется ли пластина между ВВ и порошком или нет, в порошке будет возбуждаться косая УВ одинаковой интенсивности. Разница заключается лишь в том, что при отсутствии пластины имеет место распад разрыва и УВ формируется в порошке сразу, а при наличии пластины существует разгонный участок, на котором набирается предельный угол поворота пластины. Если же толщина слоя ВВ настолько мала, что волна разрежения от свободной поверхности заряда приходит к поверхности пластины раньше, чем она повернется на максимальный угол, то это приведет лишь к тому, что параметры возбуждаемой в порошке УВ будут меньше предельных. Это означает, что кривые $\alpha_1(\varphi)$ и $\frac{p}{p_n}(\varphi)$ будут проходить ниже показанных на рис. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. 2-е изд., доп. и перераб.— Новосибирск: Наука, 1980.
2. Михайлов А. М., Дремин А. М. ФГВ, 1977, 13, 1, 115.
3. Кузьмин Г. Е., Ставер А. М. ФГВ, 1973, 9, 6, 898.
4. Штерцер А. А. ФГВ, 1982, 18, 1, 141.
5. Кузьмин Г. Е., Мали В. И., Пай В. В. ФГВ, 1973, 9, 4, 558.
6. Костюков Н. А. Тр. 2-го совещ. по обработке материалов взрывом.— Новосибирск, 1982.
7. Соболев В. В. Физика и техника высоких давлений. Вып. 19.— Киев: Наук. думка, 1985.
8. Физика быстротекущих процессов/Под ред. Н. А. Златина. Т. 2.— М.: Мир, 1974.
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. Изд. 2-е.— М.: Гостехиздат, 1954.
10. Дерибас А. А., Костюков Н. А., Ставер А. М. ФГВ, 1975, 11, 3, 456.
11. Баканова А. А., Дудолов П. П., Сутулов Ю. Н. ПМТФ, 1974, 2, 117.
12. Костюков Н. А., Ставер А. М. ФГВ, 1977, 13, 1, 92.
13. Штерцер А. А. ФГВ, 1983, 19, 2, 115.
14. Каунов А. М. Тр. 2-го совещ. по обработке материалов взрывом.— Новосибирск, 1982.

Поступила в редакцию 31/VIII 1987.
после доработки — 1/XII 1987

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ, ОБРАЗОВАВШЕЙСЯ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ ПОРИСТЫХ ОБРАЗЦОВ СВИНЦА И МЕДИ

Л. Г. Болховитинов, Ю. Б. Хвостов
(Москва)

Исследование ударного сжатия малоплотных пористых материалов позволило сделать вывод о переходе пористых веществ в газообразное состояние непосредственно в зоне сжатия ударной волны (УВ) [1]. Эти-

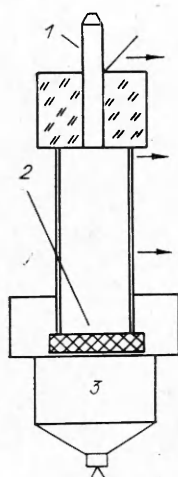


Схема эксперимента.

1 — пьезодатчик; 2 — пористый образец; 3 — заряд взрывчатого вещества.

ми процессами удается объяснить как аномальный ход ударных адиабат, так и течение вещества за фронтом УВ. Однако образование в зоне сжатия высокотемпературного вещества в газообразном состоянии, т. е. в виде неидеальной плазмы с высокой плотностью энергии, представляет самостоятельный интерес. Процесс ударного сжатия высокопористых малоплотных материалов оказывается простым методом получения вещества в виде плазмы [5].

Во многих прикладных задачах требуется получать плотную плазму тяжелых металлов. Перспективно использовать для этой цели ударное сжатие этих металлов в пористом состоянии. В работе [1] показано, что увеличение пористости $K = \rho_0 / \rho_{00}$ приводит к усилению эффектов испарения вещества в УВ (ρ_0 и ρ_{00} — плотность сплошного и пористого вещества), поэтому в данной работе исследовались ударное сжатие и последующий разлет образцов свинца и меди с $K = 25$.

Образцы пористого свинца ($\rho_{00} = 0,45 \text{ г/см}^3$) и меди ($\rho_{00} = 0,36 \text{ г/см}^3$) готовились из полосок фольги толщиной 0,02, шириной 1,5—2 и длиной 200 мм. При сборке образцов полоски перемешивались и, сминаясь, образовывали структуру, состоящую из воздушных включений, окруженных свинцовой или медной фольгой. Размеры воздушных включений определялись шириной фольги и составляли 1—2 мм. Положение ударных адиабат на фазовых диаграммах [2] свидетельствует, что пористые металлы переходят в плазменное состояние во фронте УВ. В данной работе экспериментально измерены параметры плазмы, образовавшейся при ударном сжатии пористых образцов свинца и меди. Метод, описанный в [3], основан на измерении давления торможения $p(t)$ налетающего на преграду потока плазмы, его скорости $u(t)$ и скорости отраженной от преграды и распространяющейся по набегающему потоку ударной волны $D(t)$. По этим величинам вычисляются плотность $\rho = p/Du$, гидродинамический поток энергии $W = \frac{1}{2} \rho u^3$, гидродинамическая энергия $E = \int W S dt$ (S — площадь преграды) и общая масса летящей плазмы $m = \int \rho u S dt$. В проведенных экспериментах величина $D(t)$ отличалась от $u(t)$ не более чем на 5 %. Поэтому для упрощения расчетов скорость УВ принималась равной скорости налетающего потока.

Схема опыта показана на рисунке. Плоская ударная волна, создаваемая детонацией взрывной линзы и заряда диаметром 60 и высотой 40 мм из гексогена плотностью $1,76 \text{ г/см}^3$, передавалась через плексигласовую пластину толщиной 4 мм в пористый образец диаметром 50 и высотой 10 мм. При выходе УВ на поверхность образца начинался разлет образовавшейся плазмы в стеклянную или металлическую трубу диаметром 35—40 мм, находящуюся над образцом. Образец и труба вакуумировались до давления $(4 \div 7) \cdot 10^{-3} \text{ Па}$. Скорость разлета плазмы регистрировали через боковую поверхность трубы прибором СФР. Давление торможения измеряли кварцевым пьезодатчиком, располагавшимся в центре мишени. Пьезодатчик при $p > 1 \text{ ГПа}$ калибровали манганиновым датчиком давления [4]. Рабочая масса пористого вещества, переходящего в плазменное состояние, равнялась массе образца, находившегося в площади сечения трубы. Рабочая масса заряда гексогена определялась таким же образом.

Параметры свинцовой плазмы измеряли для трех фиксированных объемов расширения, соответствовавших трубам длиной 82,7; 182,6 и 460 мм. Качественно картина разлета плазмы для различных степеней расширения была одинакова. При распространении УВ по вакуумированному пористому образцу наблюдалось яркое свечение сжимаемого

Т а б л и ц а 1

Параметры потока свинцовой плазмы

Параметры	t , мкс	u , км/с	p , МПа	ρ , г/см ³	W , МВт/см ²	E , Дж	m , г
$L = 82,7$ мм, $m_0 = 4,2$ г, $m/m_0 = 84$ %	0,1	15,30	1	$0,77 \cdot 10^{-5}$	1,4	0,68	$0,58 \cdot 10^{-5}$
	1,0	14,36	38	$0,18 \cdot 10^{-3}$	27,3	129,9	$0,12 \cdot 10^{-2}$
	2,0	13,10	78	$0,46 \cdot 10^{-3}$	51,1	518,3	$0,54 \cdot 10^{-2}$
	3,0	11,98	130	$0,91 \cdot 10^{-3}$	77,9	1143,9	$0,14 \cdot 10^{-1}$
	4,0	11,01	210	$0,17 \cdot 10^{-2}$	115,6	2048,3	$0,27 \cdot 10^{-1}$
	5,0	10,06	620	$0,61 \cdot 10^{-2}$	311,9	4005,2	$0,64 \cdot 10^{-1}$
	6,0	9,22	1 300	$0,15 \cdot 10^{-1}$	599,3	8209,7	0,156
	7,0	8,44	2 600	$0,36 \cdot 10^{-1}$	1097,2	16168,8	0,364
	8,0	7,72	6 800	0,114	2624,8	33218,1	0,905
	8,5	7,37	17 000	0,313	6264,8	55090,0	1,689
	9,0	7,04	12 000	0,242	4224,0	80897,0	2,676
	10,0	6,40	1	$0,24 \cdot 10^{-4}$	0,32	96258,0	3,535
$L = 182,6$ мм, $m_0 = 4,58$ г, $m/m_0 = 37$ %	0,1	18,42	1	$0,30 \cdot 10^{-5}$	0,9	0,5	$0,27 \cdot 10^{-5}$
	2,0	15,73	20	$0,81 \cdot 10^{-4}$	15,7	162,4	$0,12 \cdot 10^{-2}$
	4,0	13,60	42,5	$0,23 \cdot 10^{-3}$	28,9	604,7	$0,54 \cdot 10^{-2}$
	6,0	11,85	66	$0,47 \cdot 10^{-3}$	39,1	1278,3	$0,14 \cdot 10^{-1}$
	8,0	10,54	89	$0,80 \cdot 10^{-3}$	46,9	2114,6	$0,27 \cdot 10^{-1}$
	10,0	9,52	230	$0,25 \cdot 10^{-2}$	109,5	3277,9	$0,51 \cdot 10^{-1}$
	12,0	8,66	790	$0,11 \cdot 10^{-1}$	342,1	7468,0	0,155
	14,0	7,90	1 800	$0,29 \cdot 10^{-1}$	711,0	17439,2	0,452
	16,0	7,34	2 550	$0,44 \cdot 10^{-1}$	935,8	34581,1	1,047
	18,0	6,79	1 030	$0,22 \cdot 10^{-1}$	349,7	47257,4	1,555
	20,0	6,36	175	$0,44 \cdot 10^{-2}$	55,5	50009,0	1,679
	21,0	6,15	2	$0,50 \cdot 10^{-4}$	0,58	50285	1,693
$L = 460$ мм, $m_0 = 4,27$ г, $m/m_0 = 8,8$ %	0,1	19,94	0,05	$0,13 \cdot 10^{-6}$	$0,50 \cdot 10^{-1}$	$0,23 \cdot 10^{-1}$	$0,12 \cdot 10^{-6}$
	4,0	17,19	2	$0,67 \cdot 10^{-5}$	1,7	32,9	$0,21 \cdot 10^{-3}$
	8,0	15,00	4	$0,18 \cdot 10^{-4}$	3,0	122,2	$0,92 \cdot 10^{-3}$
	12,0	13,26	5	$0,34 \cdot 10^{-3}$	3,91	252,0	$0,22 \cdot 10^{-2}$
	16,0	11,82	17	$0,12 \cdot 10^{-3}$	10,1	500,4	$0,55 \cdot 10^{-2}$
	20,0	10,52	45	$0,41 \cdot 10^{-3}$	23,7	1145,8	$0,16 \cdot 10^{-1}$
	24,0	9,55	60	$0,66 \cdot 10^{-3}$	28,7	2096,2	$0,35 \cdot 10^{-1}$
	28,0	8,77	80	$0,10 \cdot 10^{-2}$	35,1	3447,6	$0,68 \cdot 10^{-1}$
	32,0	8,08	135	$0,21 \cdot 10^{-2}$	54,5	5076,1	0,114
	36,0	7,46	120	$0,22 \cdot 10^{-2}$	44,8	6918,6	0,175
	40,0	6,92	250	$0,52 \cdot 10^{-2}$	86,5	9498,7	0,277
	46,0	6,36	18,8	$0,47 \cdot 10^{-3}$	6,0	11755,2	0,376

вещества. После выхода волны на торец образца начинался разлет образовавшейся светящейся плазмы. По мере расширения интенсивность свечения убывала. Последующее торможение плазменного потока на преграде вело снова к возрастанию интенсивности свечения и по набегающему потоку плазмы распространялась отраженная УВ. Перед ней наблюдалась зона радиационного прогрева набегающего потока. Количественные изменения параметров потока плазмы при увеличении степени расширения сводились к росту максимальной скорости разлета с 15,3 до 19,9 км/с. При этом плазменный ступок расширялся, увеличивалась длительность действия плазмы на преграду и уменьшалась амплитуда импульса давления. Выход массы, максимальная плотность и энергия плазменного потока снижались. Это может быть связано как с конден-

Т а б л и ц а 2

Параметры потока медной плазмы ($L = 85,1$ мм, $m_0 = 4,2$ г, $m/m_0 = 99\%$)

t , мкс	u , км/с	p , МПа	ρ , г/см ³	W , МВт/см ²	E , Дж	m , г
0,1	15,0	1,9	$0,85 \cdot 10^{-5}$	1,4	0,7	$0,65 \cdot 10^{-5}$
1,0	13,06	19,0	$0,11 \cdot 10^{-3}$	12,4	66,6	$0,70 \cdot 10^{-3}$
2,0	11,39	40,0	$0,31 \cdot 10^{-3}$	22,8	247,3	$0,32 \cdot 10^{-2}$
3,0	10,26	62,0	$0,59 \cdot 10^{-3}$	31,8	527,7	$0,81 \cdot 10^{-2}$
4,0	9,24	84,0	$0,98 \cdot 10^{-3}$	36,0	699,2	$0,12 \cdot 10^{-1}$
5,0	8,61	220,0	$0,30 \cdot 10^{-3}$	94,7	1575,7	$0,33 \cdot 10^{-1}$
6,0	8,02	500,0	$0,78 \cdot 10^{-2}$	200,5	3247,6	$0,82 \cdot 10^{-1}$
7,0	7,55	1300,0	$0,23 \cdot 10^{-1}$	490,7	6415,5	0,188
8,0	7,15	3300,0	$0,65 \cdot 10^{-1}$	1179,7	13887,0	0,470
9,0	6,76	10500,0	0,230	3549,0	37814,0	1,489
10,0	6,50	24000,0	0,568	7800,0	95240,0	4,14
10,2	6,40	0	—	—	—	—

сацией плазмы при расширении, так и с возникновением пульсирующего режима разлета плазмы из-за торможения потока о стенку.

На найденных после взрыва остатках дюралюминиевых труб и мишенях ясно видно покрытие (особенно в случае сжатия пористой меди), напыленное в процессе разлета плазмы. Для каждого размера трубы проведено несколько опытов, результаты хорошо повторяются, что свидетельствует о стабильном характере генерации плазменного потока. Результаты экспериментов для свинцовой плазмы представлены в табл. 1, где L — длина трубы, m_0 — рабочая масса пористого. В экспериментах с пористой медью измерения проводились только для одной степени расширения ($L = 85,1$ мм). Качественно картина разлета полностью совпала с разлетом свинцовой плазмы. Количественное различие состояло в несколько большем значении плотности и массы плазменного потока и меньших значениях гидродинамической энергии. Полученные экспериментальные данные для медной плазмы приведены в табл. 2.

Таким образом измерение массы испаренного вещества подтвердило сделанный вывод о переходе пористого вещества в плазменное состояние. Масса плазменного облака для свинца составила 84 %, а для меди — 100 %. Полученные в экспериментах потоки плазмы имеют рекордные на данный момент значения плотности и массы плазмы. Коэффициент полезного действия взрывного генератора плотной плазмы, определяемый как отношение гидродинамической энергии плазмы к энергии рабочего заряда ВВ, оказывается очень высоким и равняется 24 %. Получаемая при ударном сжатии пористых образцов масса плазмы может быть неограниченно увеличена за счет массы ВВ и навески пористого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bolkhovitinov L. G., Khvostov Yu. B. Nature, 1978, 274, 5674, 882.
2. Bolkhovitinov L. G., Khvostov Yu. B. Lett. Appl. Engng. Sci., 1984, 22, 4, 491.
3. Киселев Ю. П., Самонин К. Л., Христофоров Б. Д. ПМТФ, 1981, 3, 75.
4. Гончаров А. И., Фомичев А. Г. ФГВ, 1979, 15, 4, 448.
5. Хвостов Ю. Б. Докл. АН СССР, 1987, 294, 2, 302.

Поступила в редакцию 9/VI 1986