

Для избежания разрушения скомпактированных образцов в волнах разгрузки должны быть выполнены дополнительные условия, рассмотренные в [9, 13].

Поступила в редакцию 6/VIII 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Девис.— В кн.: Быстрозакаленные металлы. М.: Металлургия, 1983.
2. C. F. Cline, R. W. Hopper. Scripta Metallurgica, 1977, 11, 1137.
3. В. Ф. Нестеренко. ФТВ, 1975, 11, 3, 444.
4. В. Ф. Нестеренко. Матер. III Международного симпозиума по обработке металлов взрывом. Т. 2. Марианские Лазни, 1976.
5. D. G. Morris. Metal Science, 1980, 14, 6, 215.
6. О. В. Роман, А. П. Богданов, Ю. Н. Волошин и др. Металловедение и термическая обработка металлов, 1983, 10, 57.
7. О. В. Роман, В. Г. Горобцов, В. С. Митин и др.— В кн.: Порошковая металлургия. Вып. 6. Минск: Высшая школа, 1982.
8. Р. С. Исаков, В. И. Кирко, А. А. Кузовников и др. Исследование структуры массивного аморфного ферромагнитного сплава $\text{Co}_{58}\text{Ni}_{10}\text{Fe}_5\text{B}_{16}\text{Si}_{11}$, полученного методом взрывного прессования, по характеристикам локальной магнитной анизотропии. Препринт Института физики им. Л. В. Киренского, № 265Ф. Красноярск, 1984.
9. R. V. Schwarz, P. Kasiraj, T. Vreeland, Jr. e. a. The effect of shock duration on the dynamic consolidation of powders. Proc. of the 3-rd APS Conf. on Shock Waves in Solids. Santa Fe, New Mexico, 1983.
10. W. H. Gourdin. Materials of International Conference on High energy rate fabrication. San Antonio, USA, 1984.
11. Г. Карслоу, Д. Егер. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
12. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
13. M. L. Wilkins. Materials of International Conference on High energy rate fabrication. San Antonio, USA, 1984.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СХОДЯЩИХСЯ УДАРНЫХ ВОЛН В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

М. Ф. Гоголя, Н. Г. Демченко, И. М. Воскобойников
(Москва)

В случае взрывного прессования и сжатия веществ в ампулах сохранения используется нагружение цилиндрических образцов скользящей детонационной волной. При таком способе нагружения в образцах образуется сходящаяся коническая волна, которая иногда дает маховский диск в вершине конуса. Образование маховского диска наблюдалось в плексигласе, стекле, воде, алюминии, порошках NiO и NaCl [1—3]. Установление стационарной волновой конфигурации, распространяющейся вдоль оси симметрии со скоростью детонации оболочки D_0 , в перечисленных веществах происходило по истечении некоторого времени. Во всех указанных случаях энергия детонационной волны используется как инструмент для создания необходимых состояний в веществе.

В настоящее время отсутствуют надежные способы расчета течений при взаимодействии ударных волн в конденсированных средах. Поэтому экспериментальное исследование является актуальной задачей.

В данной работе изучалось взаимодействие конических ударных волн в конденсированных средах — порошках эмульсионного плексигласа, магния, алюминия, графита, железа и в жидкостях — четыреххлористом углероде и бромформе. В табл. 1 приведены плотности материалов ρ_0 , значения коэффициентов при записи ударной адиабаты в виде $D = A + + Bu$, а также плотности исследованных образцов ρ_{00} (здесь u — массовая скорость в сплошной частице образца).

Ударные волны в исследуемых образцах создавали при подрыве экспериментальной сборки, схематично представленной на рис. 1. Образцы 2 помещали в цилиндрические оболочки 3 из литого ТГ. Во всех опытах

Таблица 1

Вещество	$\rho_0, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	A	B	$\rho_{00}, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Ссылки
Плексиглас	1,18	3,10	1,32	0,44	[4]
Магний	1,72	4,78	1,16	0,42	[4]
Алюминий	2,70	5,25	1,39	1,22	[5]
Графит	2,20	4,149	1,69	0,8	[4]
Железо	7,85	3,85	1,615	2,5	[4]
CCl ₄	1,59	1,17	1,72	—	[6]
СНВг ₃	2,89	0,937	1,723	—	[7]

с порошками оболочки имели внешний диаметр 40 и внутренний 20 мм, высота ~60 мм. Детонацию оболочки инициировали через металлическую преграду 4 генератором плоского фронта 5. На верхнем торце заряда находился набор плексигласовых пластин 1 с воздушными зазорами 0,08 мм, что позволяло фиксировать конфигурацию образовавшейся волны и оценивать давление в области маховского диска. Процесс регистрировали на скоростном фоторегистраторе, скорость развертки составляла 3,75 мм/мкс, щель СФР устанавливали по диаметру заряда.

Типичная фотограмма выхода ударно-волновой конфигурации в пористых образцах плексигласа на верхний торец сборки представлена на рис. 2, в, вид которой соответствует нерегулярному взаимодействию конических волн (аналогичная картина наблюдалась и в случае магния и алюминия). Обработка фотограмм позволяет определить диаметр маховского диска d , угол α между оболочкой и фронтом конической волны и интенсивность ударной волны в плексигласе на верхнем торце вблизи оси симметрии (см. рис. 2 и табл. 2).

В опытах с пористыми образцами железа и графита (см. рис. 2, а, б) наблюдается перекрытие высветов первого и второго зазоров плексигласовой сборки, которое можно объяснить тем, что скорость скольжения косой ударной волны вдоль границы плексиглас — исследуемое вещество меньше скорости ударной волны в плексигласе, образованной от детонации оболочки. В опытах с пористым графитом частично перекрывается маховский диск, что затрудняет измерение его величины. В пористых образцах железа маховская конфигурация не обнаружена. Помимо перекрытия высветов первого и второго зазоров плексигласовой сборки в вершине профиля ударной волны наблюдается сплошная засветка. Возможно, она связана с кумулятивным эффектом, поэтому в данной постановке опытов с железом не удастся определить скорость ударной волны и оценить давление. Во всех

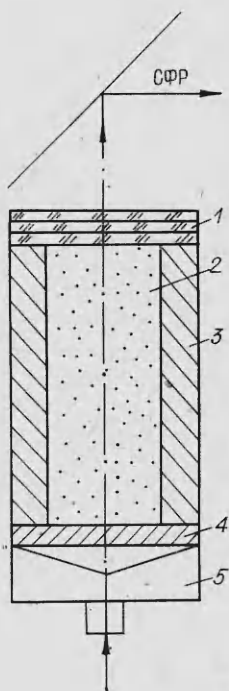


Рис. 1. Экспериментальная сборка.

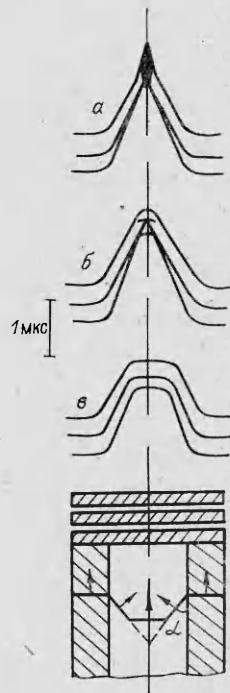


Рис. 2. Типичные фотограммы опытов с пористыми образцами.

Таблица 2

D_0 , км/с	Исследуемое вещество	d , мм	2α , град	D_{II} , км/с	Давление, ГПа		
					p_{II}	p_1	p_2
7,98	Плексиглас эмульсионный	$7,8 \pm 0,3$	66 ± 3	$8,6 \pm 0,3$	42 ± 3	38,2	35,0
7,65	Магний	$10,1 \pm 0,4$	68 ± 3	$8,6 \pm 0,3$	42 ± 3	44,0	24,8
	Алюминий:						
	$\rho_{00}=1,22$ г/см ³	$7,6 \pm 0,4$	72 ± 3	$8,8 \pm 0,3$	45 ± 3	45,2	18,1
	$\rho_{00}=2,25$ г/см ³	$6,4 \pm 0,2$	94 ± 3	$7,1 \pm 0,3$	26 ± 2	30,0	18,1
	Графит	$\sim 2,4$	62 ± 6	$9,2 \pm 0,4$	50 ± 4	44,5	23,9
	Железо	—	76 ± 6	—	—	—	—

опытах с пористыми образцами изменение угла, под которым ударная волна в исследуемых веществах отходит от оболочки, заключено в пределах от 31° до 47° , однако характер взаимодействия при равных углах может быть различным, например в случае пористых образцов железа и алюминия плотностью $\rho_{00} = 1,22$ г/см³.

В жидких прозрачных веществах (CCl_4 и $CHBr_3$) можно проследить динамику развития взаимодействия ударных волн во времени. Взаимодействие конических ударных волн в CCl_4 изучали в зависимости от геометрических размеров оболочки из литого ТГ 50/50 и профиля входящей ударной волны. В экспериментах использовали оболочки с наружным диаметром $d_n = 40$, внутренним $d_v = 20$ и высотой $h = 60 \div 120$ мм, а также с $d_n = 60$, $d_v = 35$, $h \approx 60$ мм. Ударные волны создавали непосредственно подрывом генератора плоского фронта или детонацией дополнительной таблетки из ТГ 50/50 высотой 30 мм. В начальный момент времени они имели практически одинаковую интенсивность, по различные профили.

Типичные фотограммы процесса взаимодействия ударных волн в CCl_4 , представленные на рис. 3, а, качественно сходны с фотограммами взаимодействия детонационных волн в аналогичных условиях [9]. На начальном этапе наблюдается взаимодействие плоской ударной волны с косою, отходящей от оболочки, затем следует переходная зона и в дальнейшем процесс определяется взаимодействием конической волны, что в конечном итоге приводит к образованию стационарной по времени маховской конфигурации, причем увеличение высоты оболочки в 2 раза не приводит к каким-либо изменениям. С ростом d_n от 20 до 35 мм увеличивается время образования стационарной маховской конфигурации и незначительно — размер маховского диска. Кроме того, время для образования стационарной маховской конфигурации зависит также от способа инициирования. В оболочках с внутренним диаметром 20 мм при инициировании непосредственно от генератора плоского фронта время образования стационарной маховской конфигурации составляет $\sim 4,8$ мкс, при инициировании через промежуточную таблетку $\sim 4,3$ мкс. Результаты обработки

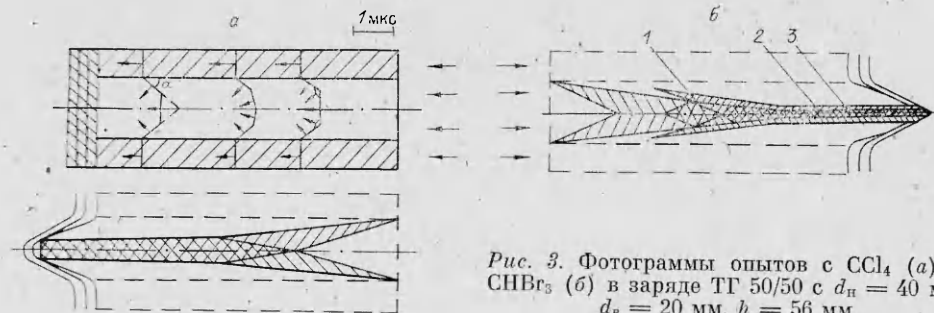


Рис. 3. Фотограммы опытов с CCl_4 (а) и $CHBr_3$ (б) в заряде ТГ 50/50 с $d_n = 40$ мм, $d_v = 20$ мм, $h = 56$ мм.

Таблица 3

d_n , мм	d_b , мм	h , мм	d , мм	2α , град	τ , мкс	D_n , км/с	p_n , ГПа
40	20	57	$6,5 \pm 0,3$	75 ± 3	$1,9 \pm 0,2$	$9,3 \pm 0,4$	52 ± 4
40	20	112	$6,6 \pm 0,3$	79 ± 3	$1,7 \pm 0,2$	$9,1 \pm 0,4$	49 ± 3
60	35	56	$7,1 \pm 0,4$	77 ± 3	$2,3 \pm 0,2$	—	—

фотограмм опытов по взаимодействию ударных волн в CCl_4 представлены в табл. 3, где указаны размеры оболочки, диаметр маховского диска d , угол α между фронтом косо ударной волны в CCl_4 и оболочкой, разновременность выхода волн на торец заряда τ , скорость ударной волны в плексигласовой сборке D_n и соответствующее ей давление p_n . Давление в CCl_4 при скорости ударной волны $D_0 = 7,65$ мм/мкс равно 53 ГПа. Давление, развиваемое в плексигласовой преграде, составляет 49 ГПа и совпадает с экспериментальными значениями p_n , представленными в табл. 3.

Аналогичные исследования проведены с СНВг_3 . В этих опытах $d_n = 10 \div 30$ мм, $d_b = 40 \div 60$ мм, $h = 60 \div 110$ мм. При этом, как и в случае CCl_4 , использовали различные способы иницирования.

Взаимодействие ударных волн в СНВг_3 носит более сложный характер (рис. 3, б) и имеет следующие отличительные особенности:

— наличие дополнительного взаимодействия, приводящего к образованию сильной волны, отходящей от оболочки (1);

— в центральной области имеются две зоны (2, 3) с четко выраженными границами;

— при выходе образовавшейся конфигурации в плексигласовую сборку вблизи оси симметрии наблюдается непрерывная засветка, что, по-видимому, связано с кумулятивными эффектами.

Объяснение взаимодействия ударных волн в СНВг_3 в настоящее время затруднительно и требует проведения дополнительных исследований.

Состояние вещества в центральной части канала в случае маховского взаимодействия волн характеризуется интенсивностью ударной волны в плексигласовой преграде (D_n , p_n). При изменении плотности алюминиевого образца от 1,22 до 2,25 г/см³ p_n уменьшилось в 1,7 раза — с 45 до 26 ГПа. Нетрудно оценить, что при той же величине D_0 для сплошного образца алюминия следовало ожидать $p_2 = 18,1$ ГПа, т. е. в 2,5 раза меньше, чем при плотности образца 1,22 г/см³. Подобное увеличение давления в плексигласовой преграде с уменьшением плотности образца наблюдалось для всех материалов, хотя в случае плексигласовых образцов значительно меньше, чем для алюминиевых.

Этому изменению p_n с плотностью образца можно дать следующее объяснение. Для большинства металлов и солей скорость ударно-волнового возмущения в пористом образце можно определить [8] из выражения $D_0^{-1} = (1 - \epsilon) D^{-1} + \epsilon (2u)^{-1}$, где $\epsilon = 1 - \rho_0/\rho$ — пористость образца; ρ_0 — плотность материала образца; D — скорость ударной волны, причем изэнтропа вещества пористого образца совпадает с изэнтропой сплошного вещества, проходящей через точку u , $p = \rho_0 Du$. Состояние в преграде, граничащей с пористым образцом, определяется из условия пересечения этой изэнтропы с ударной адиабатой материала преграды. Таким образом рассчитаны давления p_1 (см. табл. 2) в плексигласовой преграде для исследованных плотностей образцов, а также для образцов с нулевой пористостью (p_2). Рассчитанные величины p_1 и измеренные в опыте значения p_n достаточно близки, т. е. предложенный подход правильно отражает результаты эксперимента.

Проведенное исследование показало, что в пористых образцах плексигласа, магнезия, алюминия, графита и в жидком CCl_4 наблюдается маховское взаимодействие волн. Для пористых образцов железа в условиях

проведенных экспериментов маховского взаимодействия не отмечено. В случае СНВ₃ взаимодействие носит более сложный характер и требует дополнительного изучения.

В экспериментах с пористыми образцами получено увеличение давления в преграде на торце заряда с уменьшением плотности образца.

Поступила в редакцию 24/1 1984

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ададуров, А. И. Дремин и др. ФГВ, 1967, 3, 2.
2. А. И. Дремин, Г. И. Канель, В. Д. Глузман. ФГВ, 1972, 8, 1.
3. А. А. Дерибас, А. М. Ставер. ФГВ, 1974, 10, 4.
4. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
5. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, П. П. Дудолодов. ЖЭТФ, 1967, 53.
6. R. D. Dick. J. Chem. Phys., 1970, 52, 12.
7. Compendium of Shock Wave Data. University of California, Livermore, 1966.
8. J. Thouvenin. 4-th Symp. (Intern.) on Detonation. Washington, 1965.
9. М. Ф. Гоголя, И. М. Воскобойников, Н. Г. Демченко. ФГВ, 1980, 16, 1.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ЖИДКОСТЬ — ПУЗЫРЬКИ ГАЗА УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

А. И. Сычев

(Новосибирск)

Ударные волны в системах жидкость — пузырьки газа отличаются рядом характерных особенностей. Процессы распространения и структура падающих и отраженных ударных волн в жидкости с пузырьками газа при пара экспериментально и теоретически исследовались в [1—4] и приведенных в них соответствующих ссылках. Изучение разрушения одиночных пузырьков проведено в [5—7]. Исследования [1—7] выполнены на примере химически реагирующих систем.

Одним из наиболее существенных свойств рассматриваемых систем является сжимаемость пузырьков в ударной волне. Вследствие сжатия температура газа в пузырьке повышается и может оказаться достаточной для воспламенения системы, содержащей химически реагирующие вещества.

Можно выделить следующие типы химически активных систем:

- I — реагирующая жидкость — пузырьки активного газа;
- II — жидкость — горючее (или окислитель) — пузырьки газа — окислитель (или горючее);
- III — активная жидкость — пузырьки не реагирующего газа;
- IV — активная жидкость — пузырьки активного газа.

Процессы, протекающие в химически активных системах при распространении в них ударных волн, изучены недостаточно. Парогазовые пузырьки в жидких ВВ (системы III и IV) исследованы в [8]. Воспламенение одиночных пузырьков, заполненных водородо- или ацетилено-кислородной смесью в воде и цепочки пузырьков со смесью 70% $\text{Ar} + 30\%$ ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$) в глицерине (системы I) ударной волной изучались в [9, 10] и [11] соответственно. Процессы, сопутствующие распространению ударных волн в системах I, содержащих значительное число равномерно распределенных в жидкости пузырьков, и в системах II не исследованы. Задача настоящей работы — выяснить условия воспламенения систем I и II ударной волной.

Экспериментальные исследования выполнены на вертикально расположенной гидродинамической ударной трубе из нержавеющей стали с внутренним диаметром 35 мм (рис. 1), состоящей из секций высокого (1) и низкого (2) давления с разрывной диафрагмой между ними. Пу-