

в то время, как среднее расстояние между пузырьками  $l = d_0(\pi\sqrt{2}/6\beta_0)^{1/3}$  в данном случае равно  $2, 3d_0$ .

Проведенное экспериментальное исследование процесса воспламенения системы жидкость  $H_2O$  — пузырьки взрывчатой газовой смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  ударной волной показало, что в газожидкостной среде возможно существование сверхзвукового самоподдерживающегося процесса — волны детонации. Режим распространения ДВ носит квазистационарный характер.

В заключение автор благодарит А. В. Пинаева за обсуждение постановки задачи, критические замечания и за предоставленную возможность использовать созданную им аппаратуру и пьезодатчики, В. В. Митрофанова и В. К. Кедринского за обсуждение работы.

Поступила в редакцию 13/IV 1984,  
после доработки — 18/IX 1984

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Сычев. ФГВ, 1985, 21, 2.
2. Т. Hasegawa, Т. Fujiwara, М. Yasuhara. 9-th Intern. Coll. on Dynamics of Explosions and Reactive Systems. Book of Abstracts. Poitiers, 1983.
3. А. В. Пинаев. ФГВ, 1983, 19, 1, 105.
4. Г. К. Бэтчелор. Механика. Сб. переводов, № 3—109. М.: Мир, 1968.
5. А. В. Дубовик, В. К. Боболев. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару. М.: Наука, 1978.
6. J. Thouvenin. 4-th Symp. (Intern.) on Detonation (1965), U. S. Government Printing Office, Washington, 1966, p. 258.
7. А. В. Дубовик, А. А. Гончаров, В. К. Боболев. ФГВ, 1973, 9, 4, 521.
8. В. К. Кедринский. ФГВ, 1980, 16, 5, 14.
9. G. P. Glass, G. V. Kistiakowsky e. a. J. Chem. Phys., 1965, 42, 2.
10. Ю. А. Николаев, М. Е. Топчян. ФГВ, 1977, 13, 3, 393.
11. В. К. Кедринский, Р. И. Солоухин. ПМТФ, 1961, 1, 27.
12. Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. Кавитация. М.: Мир, 1974.
13. F. P. Bowden, J. H. Brunton. Proc. Roy. Soc. Lond., 1961, A263, 1315.
14. R. W. Watson, F. C. Gibson. Nature, 1964, 204, 4965.

#### УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОРИСТОГО АЛЮМИНИЯ

*М. Ф. Гоголя, И. М. Воскобойников, А. И. Простосердов*

*(Москва)*

подавляющая часть экспериментальных исследований ударного сжатия пористых материалов связана с определением скорости распространения возмущений  $D$  по пористому образцу при известном начальном состоянии в среде перед ним. Можно указать только единичные работы, в которых первичными данными являлись скорости свободных поверхностей пористых образцов [1, 2] или передаваемое через образец давление [3]. Во всех случаях нахождение конечных состояний, реализующихся в пористом образце, в значительной мере зависит от выбора той или иной модели рассмотрения пористого образца при ударном сжатии. Чтобы иметь информацию, пригодную для сопоставления различных моделей и проверки их справедливости, необходимо проведение экспериментов, связанных с определением параметров конечного состояния при ударном сжатии пористых образцов.

В настоящей работе измерены состояния в экранах различной динамической жесткости, расположенных перед пористыми образцами алюминия. Для этого использовали манганиновые датчики, полученные фототравлением из манганиновой фольги марки МНМЦАЖЗ-12-0,25-0,2 толщиной 0,03 мм. Чувствительный элемент датчика площадью  $4 \times 4$  мм с начальным сопротивлением  $\sim 3,5$  Ом изолировали фторпластовыми прокладками толщиной 100 мкм. При регистрации использовали электриче-

Материал экрана	$\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup>	$p_0$ , ГПа	$p_1$ , ГПа	$p_1/p_0$	Материал экрана	$\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup>	$p_0$ , ГПа	$p_1$ , ГПа	$p_1/p_0$
Алюминий*	2,70	17,7	17,7	1,00	Медь**	1,67	18,5	7,8	0,42
	2,70	19,5	19,5	1,00		1,67	18,5	5,3	0,28
	2,26	18,5	12,9	0,69		1,67	19,1	6,3	0,33
	2,26	19,2	13,4	0,69		1,30	18,4	2,9	0,15
	2,21	19,6	14,4	0,73		1,30	19,5	3,5	0,17
	2,01	17,9	10,4	0,58	Магний****	2,70	18,2	18,2	1,00
	1,82	16,7	8,2	0,49		2,70	17,1	17,1	1,00
	1,80	18,5	9,2	0,49		2,24	17,1	13,5	0,78
	1,68	17,3	8,4	0,48		2,03	17,2	11,9	0,69
	1,37	17,7	6,5	0,36		2,00	17,7	12,4	0,70
	1,33	18,9	6,3	0,33		1,88	17,7	11,4	0,64
				1,82		17,5	10,3	0,58	
				1,67	18,5	9,7	0,52		
				1,67	18,4	9,9	0,53		
				1,45	18,4	9,1	0,49		
				1,39	17,8	7,9	0,44		
Медь **	2,70	16,9	16,9	1,00					
	2,37	19,4	11,6	0,59					
	2,22		12,0						
	2,04	17,6	8,3	0,47					
	1,88	17,0	8,0	0,47					
	1,88	27,6***	7,0						

\*  $p_{\text{ср}} = 18,3 \pm 0,9$  ГПа.

\*\*  $p_{\text{ср}} = 18,3 \pm 10$  ГПа.

\*\*\* Вместо алюминиевой тонкой пластины использована медная толщиной 0,8 мм.

\*\*\*\*  $p_{\text{ср}} = 17,8 \pm 0,5$  ГПа.

скую схему, подобную описанной в [4], а сигнал с датчика подавали на осциллограф ОК-33М. Полученные осциллограммы расшифровывали по зависимости изменения сопротивления манганина от давления [5].

В опытах использовали следующую экспериментальную сборку. На заряд ВВ диаметром 40 и высотой 60 мм с генератором плоского фронта помещали металлический экран диаметром 60 и толщиной 5 мм. Манганиновый датчик устанавливали между экраном и тонкой алюминиевой пластиной толщиной 0,5 мм, за которой находился пористый образец алюминия. Образец диаметром 40 и высотой ~4 мм готовили прессованием из порошка марки АСД-1. В большинстве опытов экспериментальную сборку прижимали к заряду алюминиевой пластиной. Использовались экраны из алюминия, меди и магния. Выбранная постановка опыта позволяла сначала измерять давление  $p_0$ , входящее в тонкую алюминиевую пластину, а затем давление  $p_1$  по приходу к датчику волны разрежения от контактной границы сплошной алюминий — пористый алюминий. Заряд ВВ подбирали таким образом, чтобы  $p_0$  при различных экранах было одинаково.

На рис. 1 показаны типичные осциллограммы опытов с алюминиевыми экранами. Когда манганиновый датчик находился между пластинами сплошного алюминия толщиной 5 мм, регистрируется плавно спадающий профиль (рис. 1, а), определяемый геометрией сборки и заряда ВВ. Осциллограммы, полученные в опытах с пористыми образцами (рис. 1, б), существенно отличаются. Сначала регистрируется  $p_0$ , продолжительность записи которого определяется временем циркуляции волн по тонкой алюминиевой пластине, а затем резкий спад до  $p_1$  с последующим более медленным затуханием. Аналогичные записи получены в опытах с экранами из меди и магния. Результаты измерений  $p_0$  и  $p_1$  представлены в таблице.

Естественно, что в отдельном опыте давления измеряются с ошибкой, зависящей от качества используемой аппаратуры и технологии сборки. В какой-то мере ошибка характеризуется отклонениями от средних значений  $p_0$ , определенных в опытах с одинаковыми экранами. Для удобства сравнения результатов отдельных опытов находили отношения  $p_1/p_0$ , которые в меньшей степени, чем  $p_1$ , зависят от погрешностей проведения измерений.

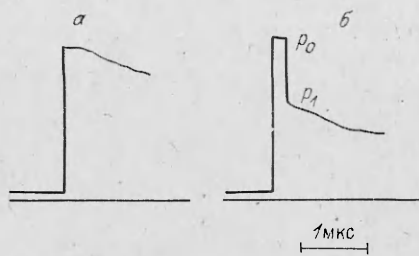


Рис. 1. Типичные осциллограммы профилей давления с алюминиевыми экранами.  
 $\rho_{00}$ , г/см<sup>3</sup>: а) 2,7, б) 2,0.

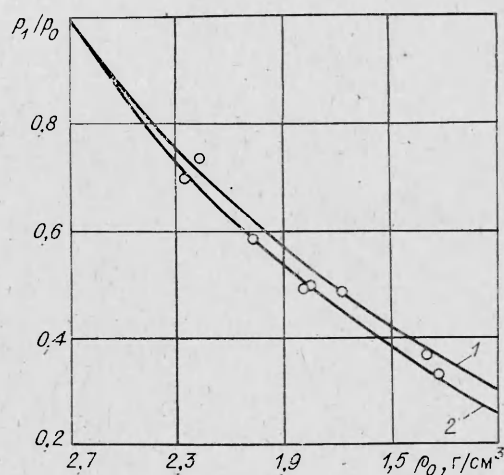


Рис. 2. Зависимость изменения  $p_1/p_0$  от начальной плотности пористого образца алюминия.

Многие особенности распространения ударных волн в пористых образцах удается количественно предвидеть результатами расчетов в рамках слойистой модели. Образец состоит из слоев сплошного вещества, параллельных ударному фронту и разделенных зазорами, которые обеспечивают нужную пористость [2]. Исходные данные для расчета: ударная адиабата сплошного материала образца и зеркальность в координатах давление  $p$  — массовая скорость  $u$  ударной адиабаты и изэнтропии нагруженного состояния. В случае одинаковых материалов образца и экрана перед ним задача сводится к рассмотрению взаимодействия ударной волны, образованной при столкновении двух соседних пластин, с двумя волнами разрежения со свободных поверхностей этих пластин. Численное решение на ЭВМ приводится на рис. 2, 1. Там же нанесены экспериментальные данные опытов с экранами из алюминия.

Для сравнительно слабых ударных волн в [2] указывалась схема построения аналитического решения без указания конечных выражений. При этом использовалось приближенное соотношение для скорости ударной волны как полусуммы скоростей звука и потоков до ударного фронта и за ним. Реализация этого решения для конечных состояний за фронтом ударной волны в пористом образце привела к выражениям

$$u = \frac{A + (2B - 1)u_0 - C}{2B}, \quad p = \rho_0(2u_0 - u)[A + B(2u_0 - u)]$$

при записи ударной адиабаты материала образца  $D = A + Bu$  и начальной массовой скорости за фронтом волны в экране перед ним  $u_0$ , где

$$C = 2Bu_0 \sqrt{\frac{t_n}{t_1} \left( \frac{t^*}{t_1} - 1 \right)} - D_{\text{пор}} \quad \text{при } t_n < t_n^1;$$

$$C = 2Bu_0 \sqrt{\frac{t_1^*}{t_1} \left( \frac{t_n^1}{t_1} - 1 \right)} - D_{\text{пор}} \quad \text{при } t_n > t_n^1;$$

$$D_{\text{пор}}^{-1} = (1 - \lambda)D_0^{-1} + \lambda(2u_0)^{-1}; \quad \lambda = \rho_{00}/\rho_0 - \text{пористость системы};$$

$$t_1 = aD_{\text{пор}}^{-1}; \quad t_n = \frac{a(1 - \lambda)D_0}{2u_0^2 B};$$

$$t_n^1 = \frac{(1 - \lambda)a}{2u_0} + \frac{a\lambda(2A + 3Bu_0 - 2u_0)}{D_0 \cdot Bu_0};$$

$$t^* = \frac{t_1^2}{t_n} \left( \frac{A + 2Bu_0 - 2u_0 - D_{\text{пор}}}{2Bu_0} \right)^2;$$

$$t_1^* = \left( \frac{A - 2u_0 + D_{\text{пор}}}{2u_0 B \sqrt{\frac{t_n^1}{t_1} - 1}} \right)^2 t_1 + t_1.$$

Результаты приближенного решения приводятся на рис. 2, 2. Применительно к условиям проведенных опытов различие между обоими решениями не превышает 5%, что меньше отклонения рассчитанных значений от экспериментальных.

Таким образом, в работе получены экспериментальные данные о динамических давлениях в экранах, расположенных перед пористыми образцами при различном соотношении сжимаемостей экранов и материала образца. В случае одинаковых материалов образцов и экранов полученным результатам дано количественное объяснение в рамках слоистой модели пористого образца.

Поступила в редакцию 6/XII 1983,  
после доработки — 19/III 1984

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. O. Johnson, J. Wackerle. 6-th Symp. H. D. P. Paris, Sept. 1967.
2. J. Thouvenin. 4-th Symp. (Intern.) on Detonation. Washington, 1965.
3. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя, Н. В. Воскобойникова и др. Докл. АН СССР, 1977, 236, 1, 75.
4. Г. И. Канель. Применение манганиновых датчиков для измерения ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, № 477-74, Деп., 1974.
5. L. M. Lee. J. Appl. Phys., 1973, 44, 9, 4017.

### РОЛЬ ФЛУКТУАЦИЙ В ЗАРОЖДЕНИИ СДВИГОВ ПРИ ОДНОМЕРНОМ СЖАТИИ РЕШЕТКИ

М. А. Могилевский, И. О. Мынкин  
(Новосибирск)

Нагружение кристаллических тел ударными волнами предоставляет уникальную возможность исследовать поведение твердого тела при экстремально высоких значениях напряжений и скоростей деформации. Как показано в [1], в процессе сжатия твердого тела при прохождении плоской стационарной ударной волны касательные напряжения могут достигать и даже превышать уровень теоретической прочности материала при чистом сдвиге в нормальных условиях. Давление на фронте волны, в которой касательные напряжения достигают теоретической прочности в меди, составляет около 25 ГПа. Что происходит в решетке при превышении касательными напряжениями уровня теоретической прочности (или, по терминологии механики сплошных сред, в состоянии с запредельной упругой деформацией)? Кратковременность процесса ударного нагружения не позволяет в эксперименте изучать развитие пластической деформации. Но снятие рентгенограмм в сжатом состоянии [2] и исследование структуры сохраненных монокристаллических образцов (см. [3, 4]) показывают, что даже в таких жестких условиях нагружения не происходит катастрофического смятия решетки во всем объеме: создается очень высокая плотность дефектов, но ориентация монокристаллов сохраняется.

Численное моделирование позволило наблюдать зарождение и развитие пластической деформации при сильном одномерном сжатии плоской кристаллической решетки [5—7]. Перестройка начиналась либо в месте благоприятной флуктуации в бездефектной решетке [5], либо вблизи точечного дефекта [6, 7]. Настоящая статья посвящена более подробному исследованию вопроса о зарождении сдвигов в одномерно сжатой решетке — состоянии, реализуемом на фронте ударной волны [4].