

12. Кректулева Р. А., Платова Т. М. // Детонация: Материалы II Всесоюз. совещания по детонации.— Черногоровка, 1981.
13. Корнилов И. И., Белоусов О. К., Качур Е. В. // Никелид титана и другие сплавы с эффектом «памяти» формы.— М.: Наука, 1977.
14. Matsumoto H., Kondo K., Doni S. J. Mater. Sci., 1987, 22.
15. Compendium of shock wave data. Univ. of California, UCRL-50108, 1, Sec. A-2, 1967.
16. Thovenin J. // 4th Symp. (Intern.) on Detonation.— White Oak, 1965.
17. Капель Г. П., Питюнин А. Н. ФГВ, 1984, 20, 4, 85.
18. Дремин А. П., Карпунин И. А. ПМТФ, 1960, 3, 184.
19. Николаевский В. Н. ПМТФ, 1969, 3, 82.
20. Богачев Г. А. Изв. АН СССР. МЖГ, 1976, 4, 113.
21. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. ПМТФ, 1971, 4, 152.
22. Афанасенков А. Н., Богомолов В. М., Воскобойников И. М. ПМТФ, 1969, 4, 137.
23. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф., Демченко И. Г. ПМТФ, 1986, 4, 91.
24. Маккуин Р., Марш С. и др. // Высокоскоростные ударные явления.— М.: Мир, 1973.
25. Дерибас А. А., Костюков Н. А., Ставер А. М. ФГВ, 1975, 11, 3, 456.

Поступила в редакцию 2/II 1988

УДК 539.63

СКОРОСТИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В АЛЮМИНИИ

*А. Ю. Долгобородов, И. М. Воскобойников
(Москва)*

Для изучения прочностных свойств веществ при высоких давлениях и описания затухания ударных волн (УВ) большой интерес представляют исследования структуры волн разрежения и определение скоростей волновых возмущений в ударно-сжатых материалах. Принято считать (см., например, [1]), что в сплошном твердом веществе волна разгрузки расщепляется на упругую и пластическую, причем фронт волны распространяется с продольной скоростью звука c_l , зависящей от упругих свойств материала, а параметры состояния в основном изменяются в пластической волне, скорость которой определяется только объемной сжимаемостью вещества. Поскольку имеющиеся сведения о прочностных свойствах материалов и уравнении состояния конденсированных сред различного состава, о строении и начальной структуре при динамических давлениях в десятки и более гигапаскалей недостаточны для развития надежных прогнозирующих схем, то актуально проведение экспериментальных исследований скоростей волновых возмущений за ударными фронтами для наиболее типичных объектов.

Для определения скоростей волн разрежения в ударно-сжатых материалах применялись разнообразные методики: от оптической регистрации моментов прихода в некоторую точку сечения образца боковой волны разгрузки и измерения скоростей откольных пластин с торцевых поверхностей образцов разной толщины до помещения в образец тех или иных датчиков (манганиновых, электромагнитных и др. [2—5]). Использование датчиков часто ограничивает временное разрешение регистрации и объекты исследования (затруднительно применение электромагнитных датчиков в проводящих средах или манганиновых датчиков в тех же средах без изолирующих прокладок) и эффективно только при плоских ударных фронтах на значительной площади сечения образца. В этом отношении более перспективны оптические методы, среди которых выделим основанные на регистрации отражения света от контактной границы исследуемого образца с прозрачной средой (различные интерференционные методики) и регистрирующие яркости собственного свечения ударных фронтов в индикаторных средах, контактирующих с торцом исследуемого образца.

Интерференционные методики принципиально позволяют достичь более высокого временного разрешения, поскольку не имеют ограничений из-за излучательной способности индикаторной среды, однако создание соответствующих установок в техническом и экономическом отношении сложнее. Кроме того, практическая реализация интерферометрических измерений сопровождалась помещением на поверхность исследуемого образца тонкой металлической фольги, которая имеет иную динамическую сжимаемость, чем образец или среда, что ведет к возникновению циркуляций волн в фольге, сказывающихся на разрешающей способности регистрации в целом. Измерение яркости свечения в прозрачных индикаторах выглядит проще, однако применение метода имеет ограничение по интенсивности волны из-за необходимости достижения сравнительно высоких температур ударных фронтов (выше 1200 К) и образования равновесного излучающего слоя.

В данной работе скорости волновых возмущений в ударно-сжатых сплошном и пористом алюминии определялись регистрацией яркости свечения ударного фронта в расположенном за исследуемым образцом четыреххлористом углероде CCl_4 , которая близка в постановке опытов к ранее использованной для нахождения давлений детонации, исследования передачи динамических давлений через различные среды, определения изоэнтроп и ударных адиабат повторного сжатия и оценки времен химической реакции в детонационной волне [7—13]. Для CCl_4 известны ударная адиабата и зависимость яркостной температуры T от давления p (на основании работ [14, 15] они записаны в виде $D = 0,94 + 2u - 0,1u^2/0,94$ и $T = 249 + 131 p$, где D — скорость УВ; u — массовая скорость, мм/мкс; T — температура, К; $8 < p < 21$ ГПа), что позволяет наблюдаемому изменению яркости свечения находить соответствующее количественное изменение состояния вещества в волне, распространяющейся по образцу. Естественно, это дает существенно большую информацию, чем простая фиксация временных изменений яркости свечения, как в [16].

Проведено две серии опытов. В первой алюминиевые пластины толщиной $h_0 = 0,9$ или $1,9$ мм, разогнанные продуктами взрыва до скоростей $w = 2,70$ мм/мкс и $4,58$ соответственно, ударили по алюминиевым мишеням диаметром 50 мм. Разгон происходил на базе 6 мм, диаметры пластин и зарядов — 40 мм. После удара по пластине и мишени распространяются УВ со скоростями $D = w$ и D , массовая скорость за которыми $u = w/2$. При выходе УВ на свободную тыльную поверхность ударника от нее отражается волна разрежения, которая на базах более h_1 догоняет ударный фронт (рис. 1). Взаимодействие волны разрежения с ударным фронтом на различных толщинах мишени исследовалось в опытах.

Волна разрежения рассматривалась простой центрированной волной, наклон характеристик которой задается $(c + u)$, где u и c — скорости массовая и звука за ударным фронтом. Если ограничиться рассмотрением первой характеристики волны разрежения, то в веществе непосредственно за фронтом волны

$$c = (D - 0,5w) (h_1/h_0 + 1) / (h_1/h_0 - 1).$$

Для определения соотношения h_1/h_0 мишени и ударника, при котором происходит догон ударного фронта первой характеристикой волны разрежения, выполнялись опыты при различной толщине мишени. Если толщина мишени была меньше h_1 , то в индикаторе в течение времени τ яркость свечения ударного фронта была постоянной, а затем спадала. На диаграмме $x - t$ этот случай показан штриховыми линиями, величина τ соответствует времени догона ударного фронта в индикаторе (его скорость D_i) характеристиками волны разрежения (их скорость в индикаторе $c_i + u_i$). При $h > h_1$ участок с постоянной яркостью свечения отсутствует. Экстраполяция зависимости h/h_0 от τ к нулевому значению τ дает искомую величину h_1/h_0 .

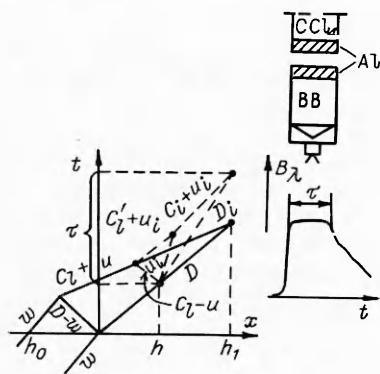


Рис. 1. Диаграмма путь — время к определению скорости звука за фронтом ударной волны в алюминии. Справа показана экспериментальная сборка и вид осциллограммы записи яркости излучения B_λ ударного фронта в CCl_4 .

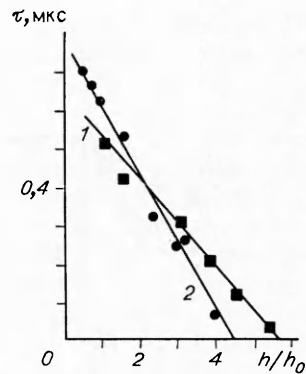


Рис. 2. Экспериментальные зависимости времени постоянного свечения от соотношения толщин мишени и ударника.

Экспериментальные данные при значениях массовых скоростей в алюминии $u_1 = 1,35$ (1) и $u_2 = 2,29$ мм/мкс (2) представлены на рис. 2. При обработке данных по методу наименьших квадратов искомые значения $h_1/h_0 = 5,45 \pm 0,10$ и $4,45 \pm 0,08$, в качестве ошибок приведены их среднеквадратичные значения. В случае использования ударной адиабаты $D = 5,25 \pm 1,39u$ можно получить для продольной скорости звука $c_{11} = 8,4 \pm 0,3$ мм/мкс при $p = 26,0$ ГПа и $c_{12} = 9,7 \pm 0,4$ мм/мкс при $p = 52,3$ ГПа. Значение c_{12} согласуется с величиной, указанной в [17] для c_l в алюминиевом сплаве при $p = 52$ ГПа. Нахождение скорости звука c_s , связанной с объемной сжимаемостью, осложнено выделением на осциллограмме записи свечения затухающей ударной волны в CCl_4 определенной точки перегиба, соответствующей переходу упругой разгрузки в пластическую. Если использовать для оценки изоэнтропической скорости звука экспериментальный факт «зеркальности» на $p-u$ -диаграмме (в некотором диапазоне давлений) ударной адиабаты и изоэнтропы нагруженного состояния, то при записи ударной адиабаты в виде $D = c_0 + bu - du^2$ из соотношения $dp = \rho c du$ имеем $c_s = (D + bu - 2du^2) \times (D - u)/D$. Найденные по этому выражению скорости звука c_s на $15 \pm 5\%$ меньше, чем c_l , т. е. подтверждается соотношение, имеющееся в начальном состоянии и отмеченное в [18]. В дальнейшем полученные значения c_l и c_l/c_s использовались для определения скоростей волновых возмущений в другой серии опытов.

Результаты измерений τ при $h < h_1$ использованы для оценки скорости звука за фронтом УВ в CCl_4 . Здесь и далее (при оценке скоростей вторичных волн сжатия в сплошном и пористом алюминии) для простоты конечных выражений волна разрежения, отраженная от контактной границы алюминий — индикатор (или пористый образец), сводилась к одной характеристике (см. диаграммы на рис. 1, 3, а, б). Погрешность, вносимая при использовании этого приближения, незначительна по сравнению с погрешностью из-за экспериментальных ошибок, поскольку время взаимодействия веера характеристик отраженной волны с первой характеристикой тыльной волны разгрузки (или вторичной волной) более чем на порядок меньше времени распространения этой волны, и можно пренебречь отклонением реальной траектории от прямой в области действия отраженной волны разгрузки. Более точное решение возможно при наличии полной информации о структуре волн разрежения с использованием достаточно сложных моделей упругопластического течения. Из диаграммы рис. 1 для скорости звука в индикаторе можно получить

$$c_i = \tau(D_i - u_i) / [\tau - (t_3 - t_1)],$$

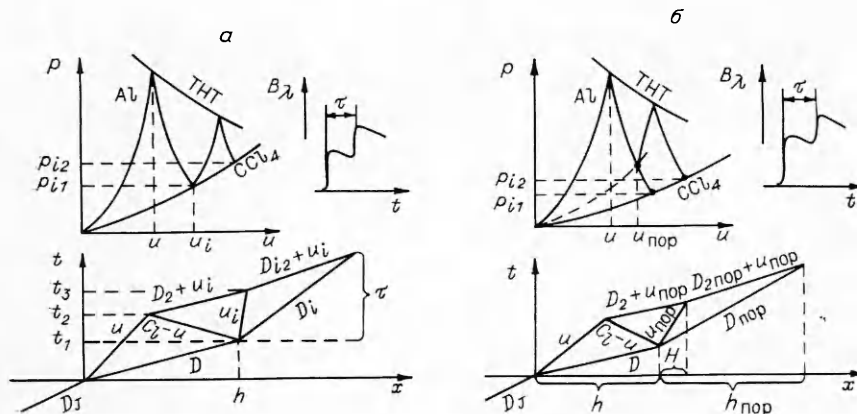


Рис. 3. $p-u$ и $x-t$ -диаграммы к определению скорости вторичной волны сжатия в ударно-сжатом сплошном (а) и пористом (б) алюминии.

где

$$t_3 - t_1 = 0,5h_0(c_1 + c'_1 + u_i - u)[(h/h_0 + 1)(D + c_1 - u) - 2c_1(h/h_0)]/(c_1 c'_1 D);$$

D_i и u_i — скорости УВ и массовая в индикаторе.

При массовых скоростях в мишени $u_1 = 1,35$ и $u_2 = 2,29$ мм/мкс имеем соответственно $u_{i1} = 1,92$ мм/мкс, $p_{i1} = 13,0$ ГПа, $c_{si1} = 3,89$ мм/мкс, $c_{i1} = 3,6 \pm 0,4$ мм/мкс и $u_{i2} = 3,11$ мм/мкс, $p_{i2} = 29,3$ ГПа, $c_{si2} = 4,82$ мм/мкс, $c_{i2} = 5,5 \pm 0,4$ мм/мкс. При $p = 13$ ГПа значения c_{si1} и c_{i1} не отличаются в пределах ошибок измерения, т. е. при оценках скорости звука в CCl_4 в некотором диапазоне давлений можно пользоваться «зеркальным» приближением, а при $p = 29,3$ ГПа $c_{si2} < c_{i2}$. Одно из возможных объяснений различия c_{si2} и c_{i2} связано с превращением (предположительно диссоциацией по связи $\text{C}-\text{Cl}$) в диапазоне $p > 21$ ГПа [15]. Для последующего изложения существенна близость экспериментально измеренной скорости звука c_{i1} в CCl_4 и рассчитанной в предположении «зеркальности» в $p-u$ -координатах ударной адиабаты и изоэнтропы.

Скорости распространения волн сжатия (вторичных УВ) за ударным фронтом в сплошном алюминии определялись в иной постановке. Тонкие алюминиевые экраны нагружались продуктами взрыва заряда тротила ($\rho_0 = 1,60$ г/см³), за экранами находился CCl_4 (см. рис. 3, а). Спустя время τ , первоначальная интенсивность свечения ударного фронта в CCl_4 возрастает при догоне первого фронта второй УВ, которая образуется в результате отражения волны разрежения, возникшей на контактной границе алюминий — CCl_4 , от контактной границы алюминий — продукты взрыва. Величина τ определяется скоростью распространения волны сжатия (второй УВ) по алюминию D_2 от границы с продуктами взрыва и скоростью D_{i2} распространения второй УВ по CCl_4 . По измерениям яркости свечения находились давления в первой и второй волнах в индикаторе p_{i1} и p_{i2} и времена τ , по значениям давлений — скорости D_{i1} и D_{i2} .

На основании изложенного выше для массовой скорости за фронтом волны в $\text{CCl}_4 \sim 1,90$ мм/мкс можно ожидать близость в $p-u$ -координатах ударной адиабаты повторного сжатия к ударной адиабате однократного, что позволяет записать выражение для скорости волны сжатия за ударным фронтом в алюминии в виде

$$D_2 = [h - t_1 u_i + t_2 (u_i - u)] / (t_3 - t_2),$$

где $t_1 = h/D$; $t_2 = t_1(D - u + c_1)/c_i$; $t_3 = [\tau(D_{i2} + u_i - D_{i1}) + t_1 D_{i2}]/D_{i2}$. Скорость волны разрежения в ударно-сжатом алюминии при $u = 1,35$ мм/мкс взята равной $c_i + u$ (в данном расчете $c_i \approx 8,4$ мм/мкс).

Т а б л и ц а 1

h , мм	τ , мкс	D_{i2}	D_2	$D_{2l}=c_l$	D_{2s}
0,90	0,45±0,03	4,3	7,4±0,4	7,48	6,80
1,48	0,71±0,03	4,3	7,4±0,4		

П р и м е ч а н и е. $u_1 = 1,35$ мм/мкс, $u_i = 1,9$ мм/мкс, $D_i = 4,3$ мм/мкс; скорости D в мм/мкс.

В табл. 1 представлены результаты оценки D_2 из проведенных экспериментов, которые сравниваются с ожидаемой величиной для скорости упругой волны $D_{2l} = c_l = 1,15 c_s$ и со скоростью второй УВ при использовании для повторного сжатия ударной адиабаты однократного сжатия D_{2s} . Наблюдается согласие значений D_2 и D_{2l} , что указывает на отсутствие разупрочнения вещества за фронтом волны в сплошном алюминии. С учетом этого времени циркуляции волн в алюминиевых экранах могут быть найдены с привлечением значений продольных скоростей звука за фронтом волны при соответствующих давлениях в прямой волне и отраженной от контактной границы с индикатором.

Возможность расчета времен циркуляций волн определенной интенсивности в алюминиевых экранах использована для оценки скоростей вторичных УВ (волн сжатия) в пористых образцах алюминия. При передаче динамических давлений от продуктов взрыва в CCl_4 через слоистую систему сплошной — пористый алюминий при близких толщинах слоев в CCl_4 наблюдается догон первого ударного фронта второй волной. Последняя связана с отражением волны разгрузки от контактной границы сплошной — пористый алюминий и затем взаимодействием ее с контактной границей алюминий — продукты взрыва. Изменяя соотношение толщины сплошного h и пористого алюминия $h_{пор}$, можно добиться того, чтобы вторая волна догоняла первую в момент выхода ее на границу пористого образца с индикатором. Найденное соотношение толщин $h_{пор}/h$ использовалось для определения $D_{2пор}$.

Скорость УВ в пористом образце будем определять по выражению [19] $D_{пор} = Du [u + 0,5\varepsilon(D - 2u)]^{-1}$, где $\varepsilon = 1 - \rho_{пор}/\rho_0$; $\rho_{пор}$ — плотность пористого образца; ρ_0 — плотность сплошных частей образца; D и u — скорости волны и за фронтом в сплошном экране. Массовую скорость за фронтом в пористом образце (и за отраженной волной разгрузки в экране) находим по формуле [13]

$$u_{пор} = 2u + \{c_0 + (1 - \varepsilon)D_{пор} - [(c_0 + (1 - \varepsilon)D_{пор})^2 + 8bu(1 - \varepsilon)D_{пор}]^{1/2}\} (2b)^{-1}.$$

Тогда из $x - t$ -диаграммы (см. рис. 3, б) получаем

$$D_{2пор} = D_{пор} u_{пор} (h_{пор}/h - H/h) [(h_{пор}/h) u_{пор} - (H/h) D_{пор}]^{-1} - u_{пор},$$

где $H/h = u_{пор} (D - u) (c_l + D_2 + u_{пор} - u) (c_l D D_2)^{-1}$.

Скорость $D_{2пор}$ определялась в опытах с зарядом тротила. Толщина алюминиевых экранов составляла 1,5—2 мм. Пористые образцы прессовались из порошков марок АСД-2, ПА-3 и ПП-1 различной дисперсности. Влияния размера частицы на передачу давления замечено не было. Тол-

Т а б л и ц а 2

ε	$D_{пор}$	$u_{пор}$	$h_{пор}/h$	$D_{2пор}$	D_{2s}	$D_{2l}=c_l$
0,3	4,78	1,79	1,80	6,8±0,4	6,6	7,7
0,5	3,90	2,05	1,25	6,2±0,4	6,2	7,3

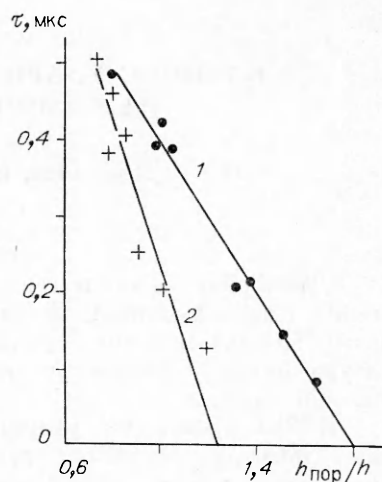
П р и м е ч а н и е. $u_1 = 1,35$ мм/мкс; D , u , c в мм/мкс.

Рис. 4. Экспериментальные зависимости времени догона ударного фронта в CCl_4 вторичной волной, образованной в слоистой системе, от соотношения толщин сплошной — пористый алюминий.

1 — $\varepsilon = 0,3$; 2 — $\varepsilon = 0,5$.

Толщина образцов менялась от 1 до 4 мм. За пористыми образцами находился CCl_4 , который отделялся от образца тонкой алюминиевой фольгой толщиной 0,02 мм. Как и при определении скорости звука в сплошном алюминии, фиксировалось время τ , за которое вторая волна догонит первый ударный фронт в индикаторе. По экстраполяции зависимости τ от соотношения толщин находилось значение $h_{\text{пор}}/h$ при $\tau = 0$. Экспериментальные данные для алюминия пористости 30 и 50 % представлены на рис. 4 и в табл. 2. При определении $D_{2\text{пор}}$ использовались полученные ранее значения c_1 и D_2 для сплошного алюминия при $u = 1,35$ мм/мкс.

В табл. 2 также приведены значения для скорости вторичной УВ D_{2s} , рассчитанной по ударной адиабате сплошного алюминия и $D_{2l} = c_l$ (предполагалось, что в первой волне пористый образец сжимается до плотности сплошного и вторая волна распространяется по среде с $u = u_{\text{пор}}$). Найденные значения $D_{2\text{пор}}$ близки к D_{2s} и заметно меньше c_l , что указывает на разупрочнение вещества за фронтом волны в пористом образце Al. Качественно это согласуется с оценками скоростей волн разгрузки для пористого алюминия в [20] при $p > 7$ ГПа. Одно из возможных объяснений снижения скорости вторичной волны по сравнению со сплошным может быть связано с частичным плавлением на контактных поверхностях частиц при ударном сжатии пористых образцов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
2. Альшшулер Л. В., Корнер С. Б., Бражник М. И. и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 4, 1064.
3. Альшшулер Л. В., Бражник М. И., Телегин Г. И. ПМТФ, 1971, 6, 159.
4. Воробьев А. А., Дремин А. И., Канель Г. И. ПМТФ, 1974, 5, 94.
5. Зайцев В. М., Похил П. Ф., Шведов К. К. Докл. АН СССР, 1960, 133, 1, 155.
6. Barker L. M. // Behaviour of dense media under high dynamic pressures.— N. Y., 1968.
7. Воскобойников И. М., Кирюшкин А. П., Афанасенков А. И. и др. // Докл. 1 Всесоюз. симп. по импульсным давлениям.— М., 1974.— Т. 1.
8. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф., Воскобойникова И. Ф. и др. Докл. АН СССР, 1977, 236, 1, 75.
9. Воскобойников И. М., Долгобородов А. Ю., Гоголя М. Ф. ФГВ, 1982, 18, 5, 117.
10. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. ФГВ, 1978, 14, 3, 105.
11. Воскобойников И. М., Долгобородов А. Ю., Афанасенков А. И. ФГВ, 1983, 19, 5, 135.
12. Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. Хим. физика, 1984, 3, 7, 1036.
13. Воскобойников И. М., Долгобородов А. Ю. // Детонация и ударные волны.— Черноголовка, 1986.
14. Афанасенков А. П., Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. и др. ФГВ, 1974, 10, 3, 392.
15. Гоголя М. Ф., Воскобойников И. М., Буланов П. В. Хим. физика, 1986, 5, 10, 1425.
16. McQueen R. G., Hopson J. W., Fritz J. N. Rev. Sci. Instrum., 1982, 53, 2, 245.
17. McQueen R. G., Fritz J. N., Morris C. E. // Shock Waves in Condensed Matter, 1983.— Elsevier Sci. Publishers B. V., 1984.
18. Curran D. R. J. Appl. Phys., 1963, 34, 9, 2677.
19. Thouvenin J. // 4th Symp. (Intern.) on Detonation.— Washington, 1967.
20. Asay J. R., Hayes D. B. J. Appl. Phys., 1975, 46, 11, 4789.

Поступила в редакцию 20/IV 1987,
после доработки — 17/VIII 1987