

8. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом.— Минск: Наука и техника, 1990.
9. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: ИЛ, 1956.
10. Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы/Под ред. С. Л. Полака.— М.: Наука, 1971.
11. Кудинов В. М., Коротцев А. Я. Сварка взрывом в металлургии.— М.: Металлургия, 1978.
12. Ишуткин С. Н., Кирко В. И., Пак Н. И. Численное исследование воздействия газового потока на поверхность сталкивающихся пластин // ФГВ.— 1974.— 17, № 1.— С. 151.

г. Красноярск

Поступила в редакцию 21/III 1991

УДК 532.593

А. Ю. Долгобородов, И. М. Воскобойников, И. К. Толстов,
А. В. Судариков

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В СМЕСЯХ

Экспериментально исследовано распространение ударных волн в двухкомпонентных смесях, сильно отличающихся по плотностям материалов. Обнаружены особенности, связанные с установлением гидродинамического равновесия за ударным фронтом. Наблюдался процесс размывания ударной волны, зависящей от соотношения сжимаемостей и плотностей компонентов, объемного содержания и дисперсности частиц тяжелого компонента и вязкости легкого.

В работе исследовалось ударно-волновое сжатие бинарных смесей из компонентов с сильно отличающимися плотностями и сжимаемостями. Интерес к исследованию бинарных смесей связан как с решением некоторых технических задач, так и поиском путей определения динамической сжимаемости веществ, для которых изготовление малопористых образцов сопряжено с большими техническими трудностями. При этом предполагается возможность пересчета ударной адиабаты смеси, приготовление образцов из которой проще, на ударные адиабаты компонентов.

В большинстве опубликованных работ ударные адиабаты смесей находились на основе измерений скоростей ударных волн D в образцах при известных параметрах волн в экранах перед образцами или скоростях ударников. Интерпретация первичных данных была такой же, как при нахождении ударных адиабат однородных веществ (см., например, [1—3]). При этом не проверялась и, как правило, даже не рассматривалась возможность существования особенностей в распределении массовых скоростей за фронтами волн из-за различия плотности и сжимаемости веществ частиц различных компонентов. Хотя ударные адиабаты многих смесей удавалось с приемлемой точностью рассчитывать по известным ударным адиабатам компонентов без рассмотрения каких-либо особенностей сжатия смесей, справедливость такого подхода неочевидна для смесей из сильно отличающихся по плотностям компонентов. В зависимости от содержания и дисперсности компонентов смеси можно ожидать появления особенностей в течении вещества за фронтом волны.

При малых содержаниях плотного компонента с невысокой дисперсностью частиц и наличии градиента скоростей между частицами легкий компонент может достаточно легко обтекать плотные частицы, постепенно вовлекая их в поток. При большом объемном содержании плотного компонента с образованием его частицами каркасной системы более вероятно многократное сжатие легкого компонента с затрудненной фильтрацией через каркасную систему. Достижение гидродинамического и теплового равновесия между компонентами за фронтом волны может происходить за времена, сравнимые с временами наблюдения процесса.

Случай с малым содержанием плотного компонента в известной степени смоделирован в [4] при помещении отдельных крупных частиц тя-

Т а б л и ц а 1

Смесь	m_1 , %	y_1 , %	δ , мкм	ρ_{00} , г/см ³	ρ_0 , г/см ³
1. ВНЖ/парафин	96,6	60,0	10	10,0	10,64
2. ВНЖ/парафин	84,0	21,5	10	4,35	4,44
3. W/Ф-4	69,0	20,0	5—20	5,50	5,65
4. W/KI	62,0	20,4	5—20	5,80	6,45
5. W/парафин	66,2	8,4	5—20	2,40	2,44
6. W/парафин	84,5	20,0	40—100	4,65	4,65
7. W/KI	62,0	20,4	40—100	6,21	6,45
8. Парафин	0	0	—	0,90	0,90

желого материала в различные порошки. С помощью метода импульсного рентгенографирования наблюдали процесс вовлечения частиц в поток в условиях двумерного ударно-волнового нагружения. Особенности течения вещества за фронтами ударных волн (УВ) в смесях с различными плотностями компонентов нашли отражение в результатах компактирования взрывом порошковых композиционных материалов при использовании цилиндрических ампул сохранения [5].

В данной работе основное внимание уделено исследованию изменений во времени состояний вещества за фронтом плоской ударной волны в малопористых бинарных смесях в диапазоне давлений 10—60 ГПа, соответствующих условиям контактного взрыва зарядов мощных взрывчатых веществ.

Образцы готовили прессованием из порошков вольфрама или композита ВНЖ (90 % W, 7 % Ni, 3 % Fe), предварительно перемешанных с парафином или порошками фторопласта Ф-4 и иодистого калия KI. В табл. 1 указаны номер смеси, массовое m_1 и объемное y_1 содержание вольфрама или ВНЖ, размер частиц δ , начальная фактическая ρ_0 и максимальная расчетная ρ_{00} плотности.

Схема проведения опытов показана на рис. 1. Ударник 4 — пластина из дюралюминия Д-16 толщиной 1,85 мм — разгонялся продуктами взрыва заряда 5 до скорости w и ударял по смесевому образцу 3 толщиной 1—5 мм. За образцом помещался экран 2 из меди или дюралюминия Д-16 и кювета с жидкостью-индикатором 1. В большинстве опытов в качестве индикатора использовался четыреххлористый углерод CCl_4 . В опытах без экрана поверхность образца покрывалась тонким слоем черного лака или к ней приклеивалась алюминиевая фольга толщиной 0,02 мм.

В экспериментах регистрировали изменение яркости свечения ударного фронта в жидкости-индикаторе за центральной частью сечения образца диаметром 5 мм (диаметр образца и ударяющей пластины 40 мм) через оптическую систему. Использовались фотоэлектронные умножители ФЭУ-119 и ФЭУ-92 с записью фототоков на осциллографах С1-75 с временным разрешением не хуже 0,03 мкс. Эффективные длины волн регистрации составляли 720 и 420 нм, причем яркостные температуры на обеих длинах волн совпадают в погрешностях измерений. Экспоненциальная зависимость яркости свечения ударного фронта в индикаторе от температуры при примерной пропорциональности температуры и давления на ударном фронте обеспечивает высокое амплитудное разрешение записи по давлению. Изменению давления на 1 ГПа для интересующих интенсивностей волн отвечало изменение яркости свечения ударного фронта в CCl_4 примерно вдвое при разбросе ее в идентичных опытах не более 20 %, причем в одной регистрации амплитудное разрешение естественно возрастает.

Для CCl_4 известны ударная адиабата и зависимость яркостной температуры от давления [6, 7]. Кроме того, в [8, 9] определялись скорости звука s и изменения температуры на изоэнтропе ударно-сжатого

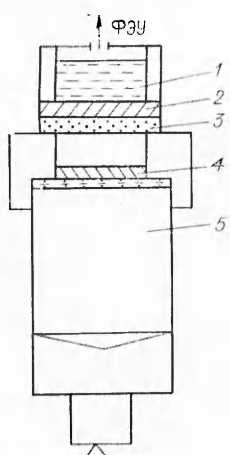


Рис. 1. Схема проведения опытов.

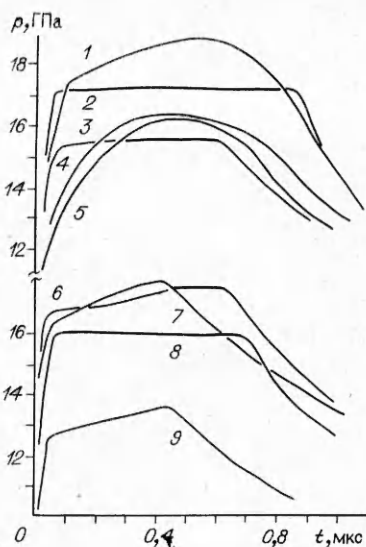


Рис. 2. Профили давления на ударном фронте в CCl_4 , расположенном за различными образцами (см. табл. 1).

1 — смесь 5 толщиной $d = 1,87$ мм; 2 — Д-16, $d = 0,88$ мм; 3 — смесь 1, $d = 1,01$ мм; 4 — 2, $d = 1,20$ мм; 5 — 6, $d = 1,48$ мм; 6 — 7, $d = 1,52$ мм; 7 — 4, $d = 1,50$ мм, экран из Д-16 с $d = 1,50$ мм; 8 — 4, $d = 1,24$ мм; 9 — 3, $d = 1,34$ мм, экран из меди с $d = 0,94$ мм.

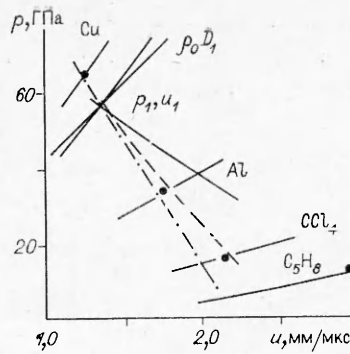
CCl_4 , которые пересчитывались на величину s . Это позволяло наблюдать изменению яркости свечения ударного фронта по мере распространения волны в индикаторе находить соответствующее изменение во времени состояний на ударном фронте в индикаторе и на контактных границах экран — индикатор и экран — образец или образец — индикатор, если изоэнтропа ударно-сжатого вещества образца известна. Ниже приводятся результаты пересчета некоторых записей яркостей свечения ударных фронтов в CCl_4 , расположенном за образцами из различных смесей, на давления на фронте волны.

После удара пластиной по сплошному однородному образцу в индикаторе регистрируется постоянное свечение ударного фронта до момента времени t , пока волна разрежения с тыльной поверхности ударника не догонит ударный фронт. Этому соответствует постоянное в течение времени t давление на фронте волны в CCl_4 (рис. 2, 2). Похожие записи яркостей свечения регистрируются после образцов смеси 1 (см. табл. 1) с малым содержанием парафина как при непосредственном контакте образца с индикатором, так и при наличии между ними не слишком толстого экрана из меди или дюралюминия (рис. 2, 3). При объемном содержании тяжелого компонента $\sim 20\%$ изменение давления во времени не имеет участка постоянного течения, соответствующая диаграмма приобретает куполообразную форму (рис. 2, 4, 5). Происходит размывание ударного фронта, вместо резкого нарастания до постоянного давления и последующего спада в тыльной волне разрежения давление постепенно нарастает до максимального и далее снижается без явно выраженного момента прихода к ударному фронту тыльной волны разгрузки. Величина максимального давления уменьшается с незначительным ростом толщины образца и начальной стадии распространения волны, хотя по регистрациям для образцов из других материалов спада давления не было до прихода тыльной волны разгрузки. При меньшем объемном содержании вольфрама (смесь 5) фронт УВ становится более крутым (рис. 2, 1), а в пределе для чистого парафина регистрируется зона постоянного течения в жидкости-индикаторе.

Для смеси мелкодисперсного вольфрама (объемное содержание $\sim 20\%$) с иодистым калием наблюдалась зона постоянного течения в CCl_4 непосредственно за образцом (рис. 2, 8), однако при помещении

Рис. 3. Сравнение измеренных и рассчитанных состояний на изоэнтропе смеси 1 при скорости ударника из Д-16 3,2 мм/мкс.

— — — $\Delta p = \rho_0 c(\Delta u)$;
 - - - - - зеркальность на $(p-u)$ -диаграмме ударной адиабаты и изоэнтропы; ● — экспериментальные значения.



перед CCl_4 дюралюминиевого экрана давление до прихода тыльной волны разгрузки постоянно нарастает (рис. 2, 7). При увеличении размера частиц вольфрама в смеси с иодистым калием давление не достигает постоянного значения на начальном этапе и при отсутствии экрана (рис. 2, 6). При передаче давлений через образцы из высокодисперсного вольфрама с фторопластом непосредственно в CCl_4 записи близки полученным для образцов из смеси с иодистым калием (см. рис. 2, 8). При наличии экрана из алюминия или меди (рис. 2, 9) зоны постоянного давления не наблюдается.

Таким образом, только для смеси 1 можно утверждать достижение определенного конечного состояния за фронтом УВ, причем содержание плотного компонента таково, что частицы смеси занимают более половины объема и образуют каркасную систему с непосредственным контактом между частицами в различных направлениях. Ниже проводится оценка этого состояния для использованной дисперсности ВНЖ, причем перенос его на смесь того же содержания и иной дисперсности неочевиден из-за отсутствия уверенности, что регистрации с использованием образцов из этой смеси будут иметь тот же вид, а не как при меньшем содержании плотного компонента. Для других исследованных смесей можно делать только оценки пределов изменения конечных состояний за ударными фронтами.

Результаты измерения состояний на ударном фронте в индикаторе CCl_4 , в том числе и при наличии промежуточных экранов, использованы для уточнения состояний в проходящей волне в образцах из смеси 1 (для других смесей указывается диапазон возможных состояний). Соответствующие значения приводятся в табл. 2, где индекс 1 относится к значениям на ударном фронте в смеси, 3 — после разгрузки в CCl_4 , 4 — на контактной границе образец — дюралюминий, 5 — на контактной границе образец — медь. Ударные адиабаты меди и дюралюминия записывались в виде $D = c_0 + bu$; $D = 3,96 + 1,5u$ при $\rho_0 = 8,9 \text{ г/см}^3$ и $D = 5,328 + 1,338u$ при $\rho_0 = 2,786 \text{ г/см}^3$ (скорости в мм/мкс), а для CCl_4 $D = 0,94 + 2u - 0,1u^2/0,94$, $\rho_0 = 1,59 \text{ г/см}^3$.

Величины D_1 , p_1 и u_1 находились из точки пересечения изоэнтропы ударно-сжатой смеси, построенной по состояниям в экранах за образцами, и ударной адиабаты материала ударника (рис. 3). Обычно величины p_1 и u_1 находились как точка пересечения луча $\rho_0 D_1$ и изоэнтропы экрана ударника. Скорость звука находилась из выражений

$$c_1 = H(D_1 - u_1) / (H/D_1 - t_2) / D_1,$$

$$t_2 = h_2(c_2 + u_1 + D_2 - w) / D_2 / c_2,$$

где H — толщина образца, на которой волна разгрузки с тыльной поверхности ударника толщиной h_2 догоняет ударный фронт; D_2 — скорость отраженной УВ в ударнике; c_2 — скорость звука за фронтом УВ в материале ударника [9]. Для нахождения H в экспериментах определялась зависимость времени постоянного свечения фронта УВ в индикаторе t от толщины образца h . В оценках c_1 для смесей 2, 3, 4 (см. табл. 1) и парафина взяты рассчитанные величины D_1 .

Смесь	w , мм/мкс	Давление, ГПа					Массовая	
		p_1	p_1^*	p_2	p_4	p_5	u_1	u_1^*
1	3,8	59,5	60,8	15,5	33,6	64,8	1,30	1,27
2	3,2	—	32,7	14—17	27,9—32,6	49,7—53,6	—	1,63
3	3,2	35,4—40,0	36,7	15,4	31,5—32,9	53,6—56,4	1,36—1,53	1,48
4	3,2	31,6—39,0	36,5	16,0	31,9—34,0	54,3—56,5	1,40—1,67	1,48
Парафин	5,04	—	28,1	34,0	—	—	3,65	—

Измеренные значения сравниваются в табл. 2 с рассчитанными в предположении аддитивности удельных объемов смесей от удельных объемов компонентов при их однократном сжатии до того же давления. Ударные адиабаты компонентов записывались в виде $D = 3,85 + 1,44u$ при $\rho_0 = 17,07$ г/см³ для ВНЖ [10], $D = 4,005 + 1,268u$ при $\rho_0 = 19,17$ г/см³ для вольфрама [11], $D = 2,96 + 1,531u$ при $\rho_0 = 0,9$ г/см³ для парафина [3], $D = 1,8 + 1,4u$ при $\rho_0 = 3,1$ г/см³ для иодистого калия [11] и $D = 2,18 + 1,58u$ при $\rho_0 = 2,19$ г/см³ для фторопласта [12]. Запишем выражения для удельного объема v и скоростей

$$v = \sum m_i v_i, \quad \sum m_i = 1, \quad u^2 = p [\sum m_i (v_{0i} - v_i)],$$

$$D = p (\sum m_i v_{0i}) / u, \quad c^{-2} = (\sum m_i v_i^2 / c_i^2) / (\sum m_i v_i^2).$$

При расчете скоростей звука для вольфрама, ВНЖ и иодистого калия использовалась зеркальность ударной адиабаты начального и изоэнтропы нагруженного состояний на $(p - u)$ -диаграмме, т. е. $c_s = (D - u) \times (D - bu) / D$, $c_i = c_{si}$. Для парафина и фторопласта с учетом данных [13] полагалось $c_i = 1,2c_{si}$.

Имеется достаточно хорошее согласие как рассчитанных, так и измеренных параметров ударно-волнового сжатия смеси 1, хотя, по-видимому, оно связано с малым содержанием в смеси парафина. В общем случае утверждение о том, что конечное состояние каждого компонента в смеси из разных по плотности и сжимаемости компонентов близко к достигаемому при однократном сжатии его до того же давления, выглядит неубедительным. Однако заметим, что любое иное описание последовательности состояний, через которые проходит каждый компонент при ударно-волновом сжатии смеси, будет значительно сложнее и при желании может быть оспорено.

На рис. 3 проводится сравнение экспериментально полученной изоэнтропы ударно-сжатой смеси 1 с рассчитанными в предположении о зеркальности ударной адиабаты и изоэнтропы и из соотношения $\Delta p = \rho c (\Delta u)$. В дополнение к приведенным в табл. 2 состояниям указано $p = 11,3$ ГПа, $u = 2,9$ мм/мкс, найденное при замене CCl_4 на 1,3-пентадиен (параметры ударного сжатия его взяты из [14]). Начальный участок изоэнтропы находится в хорошем согласии с оценкой из соотношения $\Delta p = \rho \cdot c (\Delta u)$ с использованием измеренной скорости звука 5,6 мм/мкс, которая близка к величине 5,5 мм/мкс, рассчитанной из аддитивности удельных объемов. При значительном уменьшении давления экспериментальная изоэнтропа идет выше рассчитанных, ее ход качественно напоминает тот, который бывает при испарении ударно-сжатого вещества в ходе расширения. Не исключено, что здесь это вызвано выдавливанием в волне разрежения парафина или продуктов его превращения из смеси.

Таким образом, при исследовании ударно-волнового сжатия смесей с сильно отличающимися по плотности компонентами выявлены особенности, которые мало соответствуют обычным представлениям о структуре ударной волны. В смеси из относительно легкого и подвижного парафина и частиц более тяжелых вольфрама или ВНЖ, занимающих зна-

Таблица 2

СКОРОСТЬ, ММ/МКС			СКОРОСТЬ ЗВУКА, ММ/МКС		СКОРОСТЬ УВ, ММ/МКС		Н, ММ
u_3	u_4	u_5	c_1	c_1^*	D_1	D_1^*	
2,10	1,61	1,25	5,60	5,50	4,57	4,50	3,84
1,97—2,20	1,39—1,57	1,02—1,08	—	5,47	—	4,52	—
2,09	1,53—1,57	1,08—1,12	5,30	5,45	4,17—5,30	4,44	3,75
2,14	1,54—1,62	1,09—1,12	4,68	3,89	3,21—4,11	3,84	3,20
3,33	—	—	9,96	—	—	8,55	7,50

чительный объем, но не образующих достаточно плотного каркаса, наблюдается размывание ударного фронта. При малом объемном содержании тяжелого компонента передаваемое через образец в индикатор давление в начальный момент близко к тому, которое передавалось через парафин, а затем возрастает до несколько большего значения, зависящего от толщины образца. Это можно объяснить затянутым во времени вовлечением тяжелых частиц в поток, причем процесс зависит от содержания и сжимаемости компонентов, размеров тяжелых частиц и, по-видимому, вязкости и других свойств легкого компонента. Даже в случае более привычного профиля давления, передаваемого через образец смеси с малым содержанием легкого компонента, изоэнтропа нагруженного состояния достаточно необычна. Отмеченные особенности, возможно, могут быть объяснены с позиций инерционной модели, предложенной в [5] для описания расслоения порошковых композиционных материалов в цилиндрических ампулах сохранения.

Учитывая полученные результаты по размыванию ударного фронта и неоднозначности конечного состояния за фронтом волны для ряда смесей, определение ударных адиабат таких систем на основе измерений волновых скоростей должно сопровождаться исследованиями распределения массовых скоростей и давлений во времени за фронтом волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А. Н., Карпунин И. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // ПМТФ.— 1960.— № 3.— С. 184.
2. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крушикова В. П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // Там же.— 1971.— № 4.— С. 152.
3. Мак-Куин, Марш С., Тейлор Дж. // Высокоскоростные ударные явления.— М.: Мир, 1973.
4. Костюков П. А. Структура течения бинарных смесей твердых частиц в условиях двумерного ударно-волнового нагружения // ПМТФ.— 1988.— № 3.— С. 54.
5. Костюков П. А. Механизм расслоения порошковых композиционных материалов при ударно-волновом нагружении // Там же.— 1990.— № 1.— С. 84.
6. Афанасенков А. Н., Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф. и др. Изучение характера превращения жидких веществ в ударных волнах // ФГВ.— 1974.— 10, № 3.— С. 392.
7. Гоголя М. Ф., Воскобойников И. М., Буланов И. В. Температуры ударного сжатия хлорпроизводных метана // Хим. физика.— 1986.— 5, № 10.— С. 1425.
8. Воскобойников И. М., Долгобородов А. Ю. // Детонация.— Черноголовка, 1989.
9. Долгобородов А. Ю., Воскобойников И. М. Скорости волновых возмущений за фронтом ударной волны в алюминии // ФГВ.— 1989.— 25, № 1.— С. 88.
10. D'Donoghue P. E., Predelon W. W., Anderson C. E. Dynamic launch process of preformed fragments // J. Appl. Phys.— 1988.— 63, № 2.— P. 337.
11. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва.— М.: Наука, 1975.
12. Калашников Н. Г., Кулешова Л. В., Павловский М. П. Ударное сжатие полифторэтилена // ПМТФ.— 1972.— № 4.— С. 187.
13. Павловский М. П. Измерение скорости звука в ударносжатых кварците, доломите, ангидрите, NaCl, парафине, флексиглазе, полиэтилене и фторопласте-4 // ПМТФ.— 1976.— № 5.— С. 136.
14. Гоголя М. Ф., Воскобойников И. М., Демченко Н. Г. Температуры ударного сжатия бепзола и 1,3-пентадиена // Хим. физика.— 1986.— 5, № 3.— С. 417.

г. Москва

Поступила в редакцию 6/III 1991,
после доработки — 27/IX 1991