

**УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ ПОРИСТЫХ ВОЛЬФРАМА,
МОЛИБДЕНА, МЕДИ И АЛЮМИНИЯ В ОБЛАСТИ
НИЗКИХ ДАВЛЕНИЙ****А. А. Баканова, И. П. Дудолов, Ю. Н. Сутулов***(Москва)*

Представлены результаты экспериментального изучения поведения четырех пористых металлов — молибдена, вольфрама, меди и алюминия с начальной плотностью, соответствующей ≈ 30 и 50% плотности сплошного вещества, при нагружении ударными волнами интенсивностью от 10 до 800 кбар.

Ход кривых ударного сжатия в $p - \rho$ -плоскости показывает, что при некотором давлении p^* завершается сжатие пористого вещества до состояния сплошного материала. При исходных плотностях $\approx 50\%$ сплошного вещества значения $p^* = 65, 40$ и 35 кбар для W, Mo и Cu соответственно. При меньших плотностях ($\approx 30\%$ плотности сплошного тела) значения p^* уменьшаются примерно в 2 раза по сравнению с указанными. В алюминии в обследованном интервале давлений 6.5 — 200 кбар состояния полной упаковки пористого вещества до монолитного тела не зафиксированы.

1. Поведение пористых веществ, в частности металлов, при ударном нагружении от нескольких до сотен килобар изучено в [1-6]. В этой области давлений ударные адиабаты пористых металлов в отличие от адиабат Гюгонио сплошных металлов на диаграммах давление — плотность ($p - \rho$) имеют особенности, связанные с механизмом их сжатия. Эти особенности не могут быть описаны в рамках моделей уравнения состояния, развитых в [7-9], для состояний с высокими давлениями, в которых считалось, что давления p^* — компоновки пористого вещества до монолита — предельно малы, и его ударная адиабата строилась из начального состояния сплошного материала. Построение модели сжатия пористых материалов в области малых давлений нельзя считать завершенным. Опубликованные результаты исследования их сжимаемости касаются веществ со сравнительно малой пористостью и частично противоречивы [1,2,4,6].

Образцы исследуемых материалов изготавливались из порошка с размером частиц менее 100 мк двумя способами. Образцы с плотностями, близкими к насыщенной, готовились наполнением тонкостенных (с толщиной 0.1 и 0.2 мм) алюминиевых или медных коробочек, а образцы с большими плотностями изготавливались гидростатическим прессованием таблеток диаметром $\phi = 14$ мм. Высоты образцов 2—3.5 мм. Характеристики порошков, использованных в экспериментах, приведены в табл. 1.

Для создания в изучаемых материалах ударных давлений различной интенсивности применялись взрывные устройства, описанные в [10,11]. Параметры взрывных систем, на которых выполнялись исследования, представлены в табл. 2.

Ударное нагружение образцов осуществлялось через экраны из алюминия и меди.

В опытах электроконтактным методом измерялось время распространения ударной волны по образцу (D). В каждом из опытов, схема которых приведена на фиг. 1, а и б, волновые скорости определялись одновременно для трех различных образцов. На фиг. 1, а и б: 1 — экран, 2 — образец, K_1 и K_2 — «закрытые» и «открытые» электроконтакты. Ударная

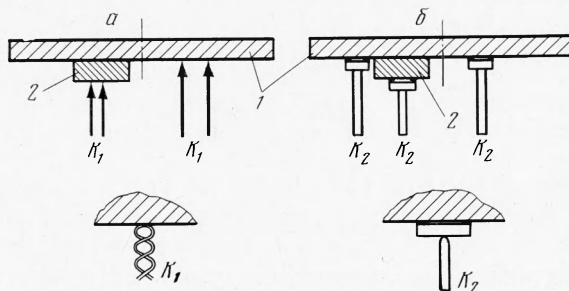
Таблица 1

Материал	Марка порошка	Содержание основного вещества, %	Насыпная пористость
Al _I	ПАК-3	96	5.5
Al _{II}	AB-0	98.4	2.1
Cu	ПМ-2	99.7	4
Mo	—	99.7	3
W	ПВ	99.8	4.3

Таблица 2

№ измерительного устройства	Материал экрана	ρ_0 , г/см ³	Параметры ударных волн в эталонах		
			u_1 , км/сек	D_1 , км/сек	p_1 , кбар
1	медь	8.93	0.17	4.20	64
2	медь	8.93	0.34	4.46	136
3	алюминий	2.71	0.69	6.21	116
4	алюминий	2.71	1.14	6.83	211
5	алюминий	2.71	1.51	7.35	301
6	алюминий	2.71	1.74	7.67	362
7	медь	8.93	1.76	6.59	1031
8	алюминий	2.71	2.76	9.09	680

волна падает на экран сверху. В области малых давлений (амплитуды ударных волн в образцах менее 100 кбар) использовались открытые контакты K_2 (схема фиг. 1, б) в виде тонких металлических стержней, отделенных от экранов и образцов фиксированным зазором величиной



Фиг. 1

0.03 мм. При более высоких давлениях в образцах применялись закрытые контакты (фиг. 1, а), изготовленные из изолированной медной проволоки с толщиной изоляции 0.01 мм, которые подводились вплотную к поверхности образцов и экранов. Средняя погрешность в определении волновых скоростей 0.5—1%.

При определении границы применения того или иного типа датчиков учитывались данные о скоростях распространения предвестников для Cu и W по [1,2], а для Mo и Al граница устанавливалась путем проведения сравнительных экспериментов с различными датчиками на одном и том же измерительном устройстве. Эксперименты показали, что применение закрытых контактов в области малых амплитуд ударных волн дает систематическое завышение величины D на $\approx 10\%$, что связано, по-видимому, со срабатыванием контактов от давления в предвестнике.

Положение ударных адиабат исследованных металлов определялось методом отражения [12,13]. Адиабаты Гюгонио и уравнения состояния материалов экранов взяты из [10,14]. В координатах волновая скорость (D) — массовая скорость (u) их адиабаты описываются соотношениями $D = 5.25 + 1.39 u$, $D = 3.95 + 1.50 u$ соответственно для Al и Cu.

Опытные данные по определению волновых скоростей D в пористых образцах и вычисленные по ним с помощью законов сохранения термодинамические параметры ударного сжатия сведены в табл. 3. Здесь приведены начальные плотности пористых (ρ_{00}) и сплошных (ρ_0) металлов, пористость $m = \rho_0/\rho_{00}$, волновые скорости D и отвечающие им значения массовых скоростей u , давления динамического сжатия p , величины, характеризующие относительные сжатия пористого материала $m\sigma = D/(D - u)$ и плотности $\rho = \rho_{00}m\sigma$. В первом столбце указан номер взрывного устройства.

Таблица 3

№ измерительного устройства	Вольфрам $\rho_0 = 19.17 \text{ г/см}^3$									
	$\rho_{00} = 10.59 \text{ г/см}^3, m = 1.81$					$\rho_{00} = 5.40 \text{ г/см}^3, m = 3.55$				
	$D, \text{ км/сек}$	$u, \text{ км/сек}$	$p, \text{ кбар}$	$m\sigma$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$D, \text{ км/сек}$	$u, \text{ км/сек}$	$p, \text{ кбар}$	$m\sigma$	$\rho, \text{ г/см}^3$
1	0.87	0.27	24.9	1.451	15.38	0.62	0.31	10.4	2.000	10.80
2	1.16	0.52	63.8	1.813	19.20	0.85	0.61	28.0	3.542	19.13
3	1.56	0.70	116	1.814	19.21	1.31	0.95	67.2	3.640	19.71
4	2.21	1.03	241	1.873	19.84	2.03	1.41	154	3.270	17.60
5	2.67	1.29	365	1.935	20.50	2.50	1.77	239	3.425	18.50
6	2.93	1.44	447	1.966	20.82	2.78	1.98	297	3.475	18.76
7	4.04	1.98	847	1.961	20.77	3.60	2.51	488	3.303	17.83
8	—	—	—	—	—	4.19	2.86	647	3.150	17.01

Молибден $\rho_0 = 10.20 \text{ г/см}^3$

	$\rho_{00} = 5.59 \text{ г/см}^3, m = 1.82$					$\rho_{00} = 3.29 \text{ г/см}^3, m = 3.1$				
	$D, \text{ км/сек}$	$u, \text{ км/сек}$	$p, \text{ кбар}$	$m\sigma$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$D, \text{ км/сек}$	$u, \text{ км/сек}$	$p, \text{ кбар}$	$m\sigma$	$\rho, \text{ г/см}^3$
1	0.86	0.30	14.4	1.536	8.58	0.65	0.32	6.84	1.970	6.48
2	1.21	0.58	39.2	1.921	10.74	0.95	0.64	20.0	3.064	10.10
3	1.80	0.86	86.5	1.915	10.70	1.56	1.04	53.4	3.000	9.87
4	2.67	1.26	188	1.894	10.59	2.39	1.56	123	2.880	9.47
5	3.25	1.57	285	1.935	10.82	2.96	1.97	192	2.990	9.84
6	3.59	1.76	353	1.962	10.97	3.26	2.23	239	3.165	10.41
7	4.75	2.31	613	1.947	10.88	4.14	2.71	369	2.900	9.54
8	—	—	—	—	—	5.01	3.21	529	2.783	9.16

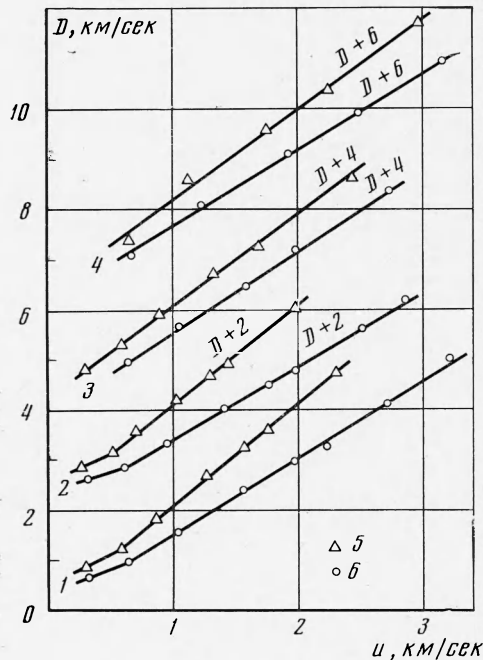
Медь $\rho_0 = 8.93 \text{ г/см}^3$

	$\rho_{00} = 4.67 \text{ г/см}^3, m = 1.91$					$\rho_{00} = 3.00 \text{ г/см}^3, m = 2.98$				
	$D, \text{ км/сек}$	$u, \text{ км/сек}$	$p, \text{ кбар}$	$m\sigma$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$D, \text{ км/сек}$	$u, \text{ км/сек}$	$p, \text{ кбар}$	$m\sigma$	$\rho, \text{ г/см}^3$
1	0.84	0.30	11.8	1.556	7.27	—	—	—	—	—
2	1.31	0.60	36.7	1.845	8.60	0.98	0.64	18.8	2.882	8.65
3	1.91	0.89	79.4	1.873	8.75	1.68	1.04	52.4	2.625	7.87
4	2.74	1.33	170	1.943	9.07	2.45	1.59	117	2.849	8.55
5	3.29	1.69	2.60	2.056	9.60	3.19	1.98	189	2.636	7.91
6	4.66	2.44	531	2.100	9.80	4.36	2.73	357	2.675	8.02

Алюминий $\rho_0 = 2.71 \text{ г/см}^3$

	$\rho_{00} = 1.35 \text{ г/см}^3, m = 2.01$					$\rho_{00} = 0.9 \text{ г/см}^3, m = 3.01$				
	$D, \text{ км/сек}$	$u, \text{ км/сек}$	$p, \text{ кбар}$	$m\sigma$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$D, \text{ км/сек}$	$u, \text{ км/сек}$	$p, \text{ кбар}$	$m\sigma$	$\rho, \text{ г/см}^3$
2	1.41	0.65	12.4	1.855	2.50	1.09	0.67	6.60	2.595	2.33
3	2.60	1.12	39.3	1.757	2.37	2.09	1.23	23.1	2.430	2.19
4	3.60	1.76	85.5	1.957	2.64	3.11	1.93	54.0	2.636	2.37
5	4.36	2.25	132	2.066	2.79	3.92	2.49	88.0	2.741	2.47
7	5.71	2.97	229	2.084	2.81	4.94	3.16	140	2.775	2.50

2. Результаты выполненных исследований представлены в графическом виде на $D - u$ -диаграмме на фиг. 2 (1 — Mo, 2 — W, 3 — Cu, 4 — Al) и в $p - \rho$ -координатах на фиг. 3 для Cu (а) и Mo (б, верхняя шкала), и для W на фиг. 4. На фиг. 2—4 точки 5 соответствуют экспериментальным



Фиг. 2

данным табл. 3 с пористостью $m \approx 2$, а точки 6 — с $m \approx 3$. Ударные адиабаты пористых металлов, построенные по $D - u$ -зависимостям, изображены на фиг. 3, 4 сплошными линиями 1 для $m \approx 3$, 2 — для $m \approx 2$ с начальными состояниями в точках 7 и 8 соответственно для пористостей ≈ 2 и 3. На $p - \rho$ -диаграммах изображены также кривые ударного сжатия 3 сплошного материала ($m = 1$) по данным [8, 10, 13-15]. Стрелками показаны границы вероятного экспериментального разброса ряда опытных точек.

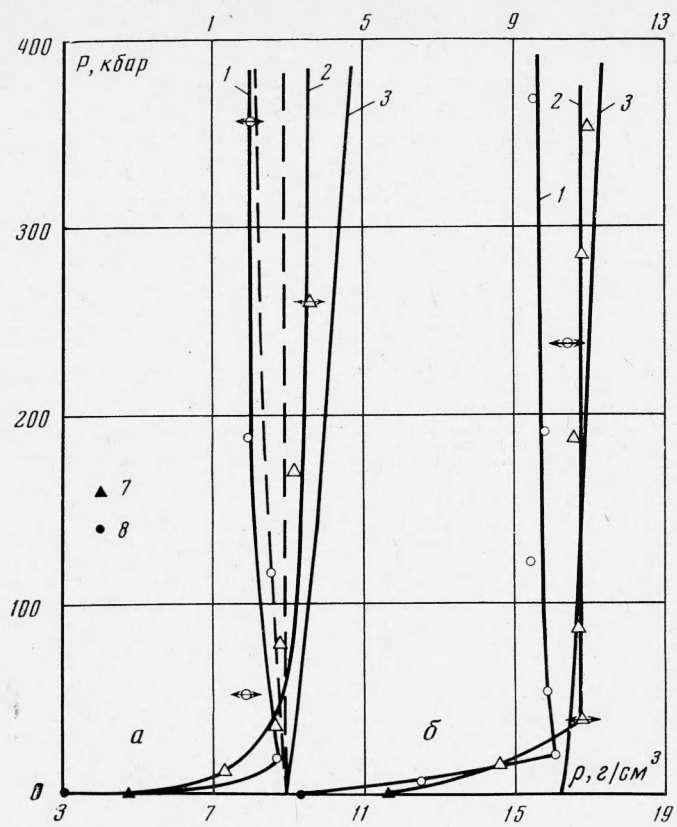
Из фиг. 3 и 4 следует, что кривые ударного сжатия пористых W, Mo и Cu имеют характерный вид. В области малых амплитуд (ниже p^*) плотность быстро возрастает с давлением и при давлении p^* становится равной или близкой к плотности сплошного материала, сжатого до того же давления p^* . При давлениях, больших p^* , эти кривые отходят от кривой сжатия сплошного материала в область меньших плотностей и тем сильнее, чем ниже исходная плотность пористого материала. Для начальной плотности, соответствующей $\approx 50\%$ -ной плотности монолитного материала, давления полного уплотнения 65 кбар для W, 40 кбар для Mo и 35 кбар для Cu. С понижением начальной плотности полная компоновка достигается при меньших давлениях. Так, при пористости $\approx 30\%$ от плотности сплошного вещества значения p^* снижаются до 30, 20 и 18 кбар соответственно для W, Mo и Cu.

В исследованной области на $D - u$ -диаграммах экспериментальные точки, относящиеся к давлениям выше p^* , располагаются вдоль прямых линий и могут быть аппроксимированы соотношениями вида $D = C_0 + \lambda u$ со значениями C_0 , близкими к нулю.

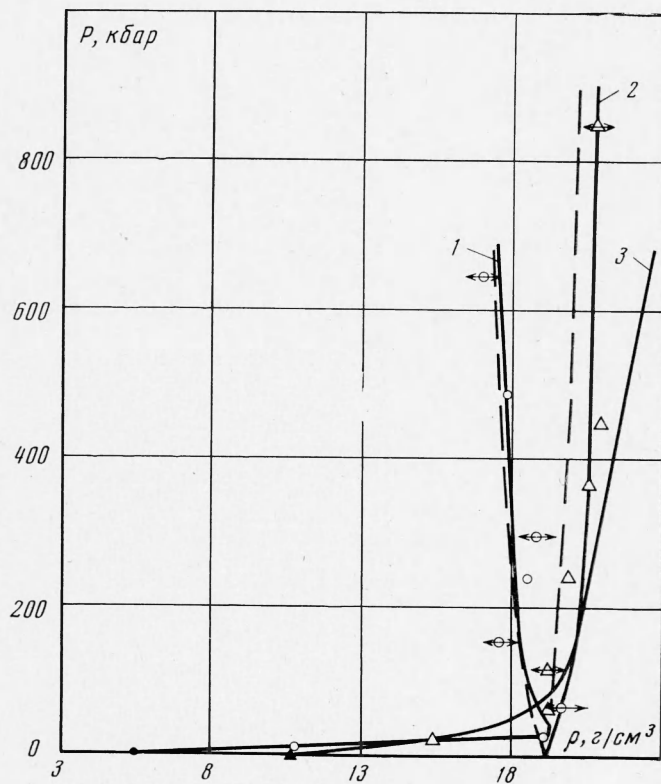
Физически такой вид зависимости ($D \approx \lambda u$) означает, что относительная плотность ударного сжатия не растет по мере увеличения давления, а остается практически постоянной и равной предельной плотности

$$\sigma = \lambda / m (\lambda - 1)$$

Характер поведения кривых ударного сжатия пористого алюминия отличается от других исследованных металлов — W, Cu и Mo. В обследованном диапазоне давлений 6 ÷ 250 кбар не было зафиксировано сжатия пористого материала до состояния сплошного тела. При наименьших давлениях, достигнутых в эксперименте (6.5 и 12.5 кбар), для начальных плотностей $\rho_{00} = 0.9$ и 1.35 г/см^3 пористые ударные адиабаты ближе всего подходят к кривой сжатия сплошного алюминия. Однако при этом



Фиг. 3



Фиг. 4

