

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ, ПЛАСТИЧНОСТИ МАТЕРИАЛА И РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ РАЗДРОБЛЕННОЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС УДАРНО-ВОЛНОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

В. А. Огородников, М. В. Жерноклетов, С. В. Михайлов, С. В. Ерунов, В. В. Комиссаров

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607188 Саров, root@gdd.vniief.ru

Исследован процесс динамического деформирования ударно нагруженных цилиндрических «пористых» образцов свинца, вольфрама и сплава ВНЖ-95, состоящих из частиц размерами $0.1 \div 2.5$ мм. Интенсивность ударных волн была несколько ниже значений, соответствующих полному компактированию материала. Изучена степень влияния размеров частиц, прочности и пластичности их материала на рассматриваемые процессы.

Ключевые слова: раздробленная среда, компактирование, прочность, пластичность, размер частиц, ударные волны.

При решении ряда прикладных задач, связанных, например, с разгоном цилиндрических оболочек с помощью энергии взрыва, возникает необходимость прогнозирования характеристик этого процесса. Проблема заметно усложняется, если материал оболочки в процессе разгона теряет компактность. Причины потери компактности могут быть связаны с откольным разрушением оболочки, ее дроблением сдвиговыми напряжениями или потерей устойчивости в процессе схождения оболочки [1–3]. Для корректного расчета движения оболочки в таком состоянии необходимо знать поведение раздробленного материала при динамическом сжатии. О среде с разрывами сплошности говорят как о поврежденной, раздробленной или как о пористой. В качестве примеров таких сред можно назвать также песок, щебень, стружку, спеченные порошки, различные пеноматериалы и керамики. Исследование их поведения при динамическом сжатии, особенно в области давлений, соответствующей их полному компактированию, представляет самостоятельный интерес. Следует отметить, что создание достоверных моделей деформирования таких материалов тормозится отсутствием экспериментальных данных об их поведении при динамическом сжатии. Особенно это касается материалов с широким спектром характерных размеров частиц (от десятков микрометров до единиц миллиметров).

В области сравнительно невысоких давлений при динамическом или ударно-волновом

воздействии частицы рассматриваемых материалов сначала нагружаются ударной волной (УВ), а затем разгружаются в окружающие их поры. Из-за конечного объема «порового» пространства в частицах происходит несколько циркуляций волн сжатия и разгрузки. Это приводит к формированию зоны перехода между фронтом УВ и областью конечных состояний, ширина которой определяется временем затухания циркулирующих в частицах волн сжатия и разгрузки или времени схлопывания пор, а также тепловой релаксацией частиц [4]. После затухания колебаний УВ распространяется в стационарном режиме, а диссипация кинетической энергии материала частиц в зоне ударного перехода приводит к увеличению тепловой составляющей внутренней энергии и повышенному ударному разогреву пористого материала. Для спеченных порошков, пеноматериалов и керамик, частицы которых связаны каркасом, наряду с отмеченными закономерностями существуют дополнительные особенности, обусловленные сжатием или ломкой каркаса. Вследствие этого поведение пористого или раздробленного материала при ударно-волновом сжатии может характеризоваться распространением по нему сложных многоволновых структур, состоящих из одного или двух упругих предвестников и волны необратимого сжатия [5–10]. Так, если частицы пористой среды связаны между собой каркасом, то по ней распространяется трехволновая конфигурация [5–7, 9]. При этом первая волна является упругой, вторая

Таблица 1

Материал	Δ , мм	ρ_{00} , г/см ³	k
ВНЖ-95	0.25 ÷ 0.5	9.8 ± 0.4	1.84 ± 0.08
	0.5 ÷ 0.7	8.9 ± 0.4	2.02 ± 0.08
	1.6 ÷ 2.5	10.4 ± 0.1	1.73 ± 0.02
Вольфрам	0.1	6.7 ± 0.1	2.68 ± 0.1
Свинец	2.0 ÷ 2.5	7.3 ± 0.1	1.55 ± 0.05

волна обусловлена ломкой каркаса, а третья — дроблением фрагментов и уменьшением степени их анизотропии, т. е. является волной необратимого сжатия. Если частицы пористой среды не связаны между собой каркасом, то по ней распространяется двухволновая конфигурация [8, 10]. Такую среду будем называть раздробленной. Из анализа литературных данных следует, что для широкого спектра пористых материалов, начиная от пенопластов и заканчивая металлокерамиками, давление, при котором наблюдается многоволновой профиль волны сжатия, не превышает 5 ÷ 7 ГПа. Именно этот диапазон давлений представляет наибольший интерес при проведении исследований. Заметим, что исследование пористых материалов в работах [5–7, 10] проводилось при характерном размере частиц менее 0.1 мм. Возникает вопрос о справедливости наблюдаемых закономерностей для пористых материалов с характерным размером частиц до нескольких миллиметров.

В данной работе представлены результаты исследования процесса динамического сжатия порошка вольфрама с размером частиц $\Delta \approx 0.1$ мм, композитного материала ВНЖ-95 с $\Delta = 0.25 \div 2.5$ мм и свинца с $\Delta = 2 \div 2.5$ мм. Частицы сплава ВНЖ-95 (95 % вольфрама, 1.5 % железа и 3.5 % никеля) с начальной плотностью $\rho_0 = 18.0$ г/см³ имели чешуйчатую форму и были получены путем помола стружки с последующим разделением по фракциям с размером частиц 0.25 ÷ 0.5, 0.5 ÷ 0.7 и 1.6 ÷ 2.5 мм. Частицы свинца имели сферическую форму. Использование этих материалов, заметно различающихся прочностью и пластичностью, связано с выяснением влияния указанных характеристик на ход кривых сжатия пористых материалов. Наряду с этим исследовалось влияние размеров частиц на сжатие при близкой пористости образца.

Частицы плотно упаковывали в обойму,

взвешиванием определяли фактическую плотность пористого материала ρ_{00} и соответствующую ей пористость $k = \rho_0/\rho_{00}$. В табл. 1 представлены некоторые характеристики исследуемых материалов. Эксперименты проводили в баллистической ударной трубе БУТ-76 [11], которая позволяет исследовать динамическую сжимаемость материалов в стационарных ударных волнах при скоростях ударников до $W_0 \approx 500$ м/с. Большие скорости ударников получены во взрывных экспериментах. Схема постановки экспериментов показана на рис. 1.

В экспериментах, проводимых по схеме рис. 1, а, частицы исследуемого материала упаковывали в обойму из стали толщиной 10 мм с внутренним и наружным диаметрами 40 и 95 мм соответственно и закрывали с двух сторон медными экранами толщиной 2 мм. Поскольку экспериментальная сборка находилась в посадочном месте вакуумированного ствола БУТ-76, остаточное давление воздуха в котором составляло ≈ 2 кПа, то и в пространстве между частицами давление воздуха было тем же. Мишени нагружали ударниками из стали толщиной 22 мм и диаметром 75 мм, что позволяло создать в образце стационарную УВ длительностью ≈ 10 мкс. Скорость ударников измеряли электроконтактными датчиками с точностью не хуже 0.5 %. Толщину медных экранов выбирали такой, чтобы устранить микрокумуляцию, связанную с закрытием пустот в материале, и создать неплоскостность торцевых поверхностей мишени не более ≈ 0.01 мм, что позволяет уменьшить перекося при соударении ударника и мишени до 10^{-3} рад.

В каждом опыте емкостным датчиком [12] диаметром 10 мм регистрировали профиль скорости свободной поверхности $W(t)$ медного экрана, осредненной по этому диаметру. Электроконтактный датчик, установленный на поверхности соударения ударника и мишени, использовали для получения на осциллограммах отметки времени, соответствующей началу распространения УВ в мишени. В дальнейшем, исходя из известных толщин образца и экранов и измеренного временного интервала между моментом соударения ударника с мишенью (электроконтактный датчик) и выходом УВ на свободную поверхность (емкостной датчик), определяли скорость волны в образце. По результатам расчетов и опытов, в которых пористый материал заменяли эталонным образцом из полиэтилена или алюминиевого сплава

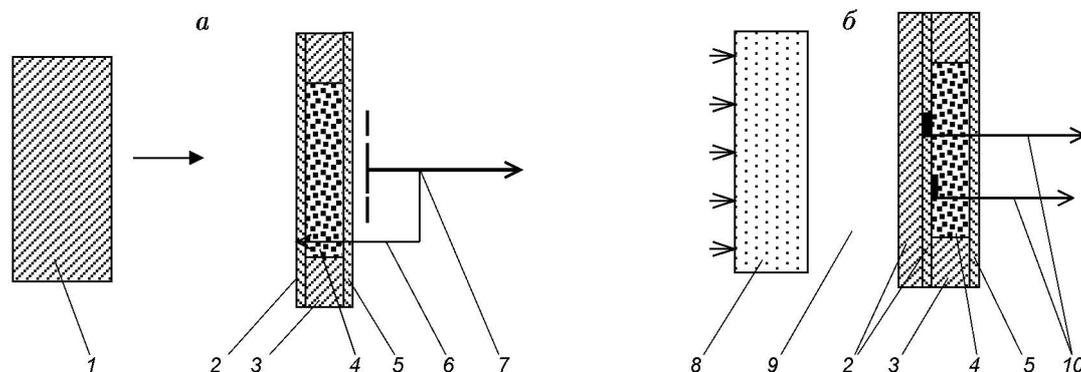


Рис. 1. Схема проведения опытов:

1 — ударник, 2, 5 — медный экран, 3 — обложка, 4 — исследуемый материал, 6 — электроконтактный датчик, 7 — емкостной датчик, 8 — слой взрывчатого вещества, 9 — воздушный зазор, 10 — манганиновые датчики давления

АМГ-6, было установлено, что такая постановка позволяет без искажений определять профиль волны сжатия $p(t)$ в пористом материале. Профили скорости свободной поверхности медных экранов, зарегистрированные при исследовании ударного сжатия образцов из раздробленного сплава ВНЖ-95 с размером частиц $0.5 \div 0.7$ мм, показаны на рис. 2, а. На рис. 3 приведены фотографии продольного сечения образцов из свинца до и после ударно-волнового нагружения при различных скоростях ударника W_0 , соответствующих различным степеням компактирования материала, а также фотография образца ВНЖ-95.

Анализ профилей $W(t)$ показывает сложный характер ударно-волнового деформирования раздробленного материала при динамическом сжатии. При $W_0 \approx 40 \div 100$ м/с наблюдаются «затянутые» профили волны сжатия. По мере увеличения скорости ударника или амплитуды давления длительность переднего фронта уменьшается. Профили $W(t)$ раздробленного ВНЖ-95 с размером частиц $0.25 \div 0.7$ мм близки, и при $W_0 < 100$ м/с их конфигурация приближается к двухволновой. Для образцов из ВНЖ-95 с размером частиц $1.6 \div 2.5$ мм отмеченная особенность выражена слабее. Это согласуется с выводами работы [8]: ширина фронта волны сжатия в пористом материале определяется временем затекания пор, которое тем больше, чем больше характерные размеры пор или зерен. Заметим, что аналогичную регистрируемой структуру, состоящую из двух волн сжатия, наблюдали, например, при исследовании динамиче-

ского сжатия образцов из пористого алюминия [8] и прессованного порошка меди [10] при пористости $k \approx 1.2 \div 1.5$ и близких скоростях нагружения ударником. С увеличением интенсивности нагружения вторая волна догоняет первую, профили $W(t)$ трансформируются и при $W_0 \approx 300$ м/с двухволновой конфигурации уже не наблюдается.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 2, где W_0 — скорость ударника; ρ_{00} — плотность образцов; $D_{1,пор}$, $D_{2,пор}$ — измеренные скорости соответственно первой и второй волн сжатия в раздробленном материале; $u_{1,пор}$, $u_{2,пор}$ — их массовые скорости, а $p_{1,пор}$, $p_{2,пор}$ — давления; k_σ , ρ , v — соответственно коэффициент сжатия, плотность и объем раздробленного материала за фронтом второй волны сжатия, $k_\sigma = D_{2,пор} / (D_{2,пор} - u_{2,пор})$, $\rho = k_\sigma \rho_{00}$, $v = 1/\rho$. Состояние в раздробленном материале во второй волне сжатия определяли с использованием метода отражения [13] по формулам

$$u_{2,пор} = \frac{W_0 2(\rho c)_{Fe}(\rho c)_{Cu}}{[(\rho c)_{Fe} + (\rho c)_{Cu}][(\rho_{00} D_2)_{пор} + (\rho c)_{Cu}]},$$

$$p_{2,пор} = (\rho_{00} D_2)_{пор} u_{2,пор},$$

полученным в акустическом приближении из закона сохранения импульса при рассмотрении распада произвольного разрыва на контактной границе «медный экран — пористый материал» (здесь c — скорость звука). Состояние в первой волне сжатия оценивали по формулам

$$u_{1,пор} = u_{Cu} \frac{(\rho c)_{Cu} + (\rho D)'_{пор}}{(\rho_{00} D_1)_{пор} + (\rho D)'_{пор}},$$

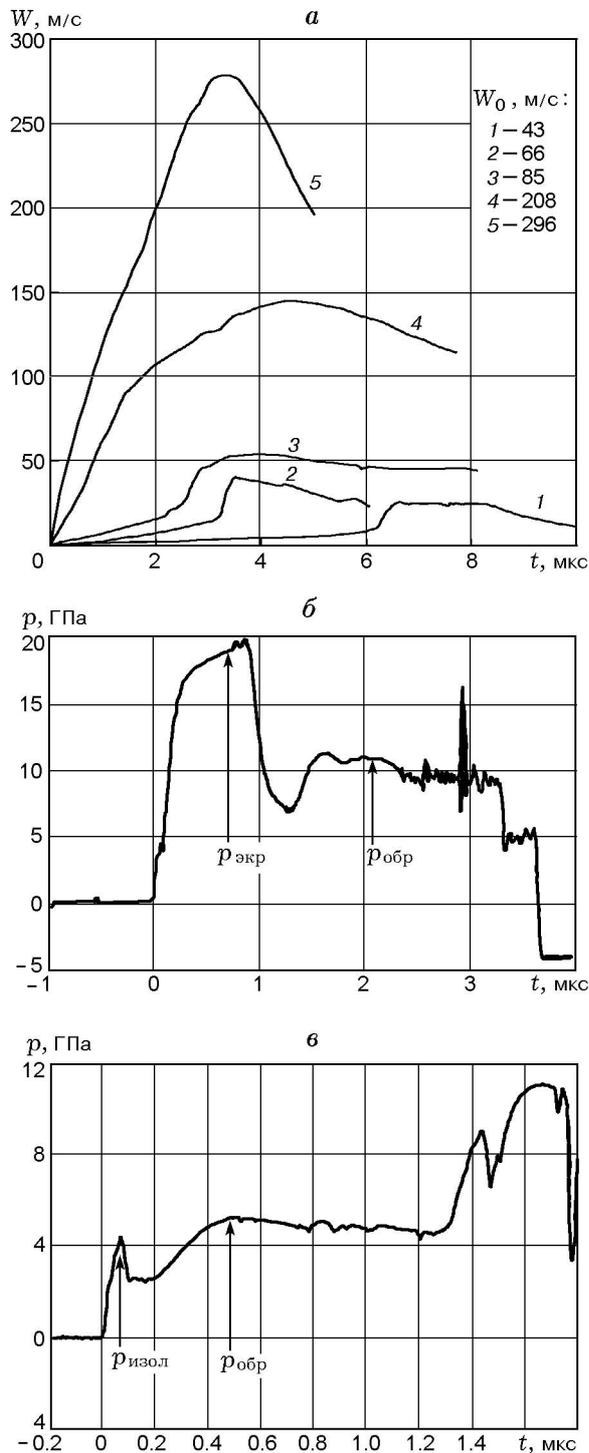


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности (а) и давления в медном экране (б) и на границе экран — образец (в), зарегистрированные емкостным и манганиновым датчиками соответственно

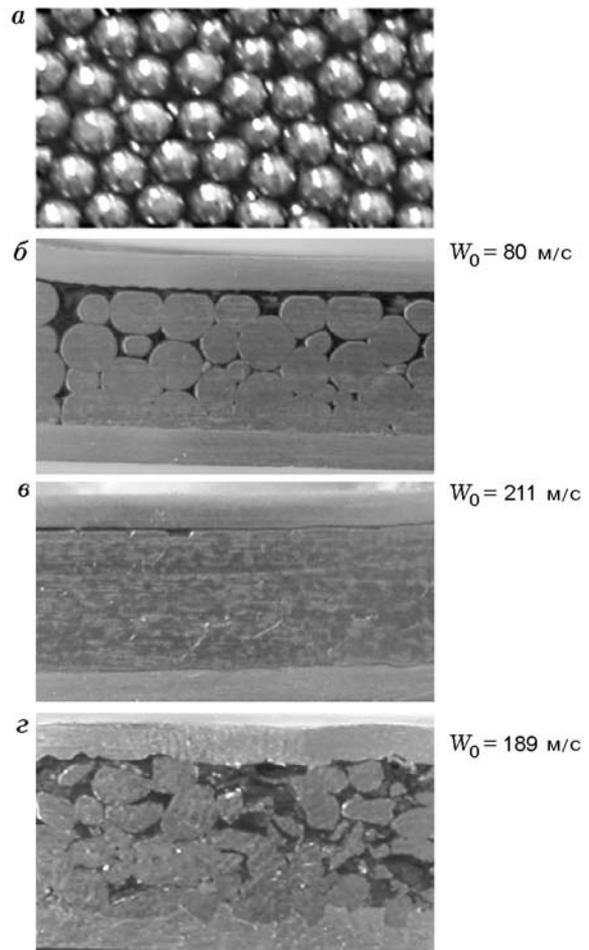


Рис. 3. Фотографии продольного сечения образцов:

а — образец из свинца до ударно-волнового нагружения, б, в — после нагружения при различных скоростях ударника, г — образец из ВНЖ-95

$$p_{1,пор} = (\rho_{00} D_1)_{пор} u_{1,пор},$$

полученным в акустическом приближении из закона сохранения импульса при рассмотрении распада произвольного разрыва на контактной границе «пористый материал — медный экран». При этом величину $(\rho D)'_{пор} = (p_{Cu} - p_{2,пор}) / (u_{2,пор} - u_{Cu})$ определяли из совокупности экспериментальных данных, полученных методом отражения и при регистрации профилей $W(t)$. Отметим, что величина $(\rho D)'_{пор}$ зависит от состояния раздробленного материала, сжатого за фронтом УВ, и изменяется от значения $(\rho_{00} D)_{пор}$ для данной интенсивности нагружения до значения $\rho_0 D$ для сплошного материала.

При исследовании динамического сжатия

Таблица 2

Материал	Δ , мм	W_0 , м/с	ρ_{00} , г/см ³	$D_{1,пор}$, м/с	$D_{2,пор}$, м/с	$u_{1,пор}$, м/с	$u_{2,пор}$, м/с	$p_{1,пор}$, МПа	$p_{2,пор}$, МПа	k_σ	ρ , г/см ³	v , см ³ /г
ВНЖ-95	0.25 ÷ 0.5	35	9.8	364	304	11	34	35	101	1.13	11.00	0.091
		56	9.7	356	323	9	54	33	169	1.20	11.60	0.086
		60	9.7	376	357	8	57	31	197	1.19	11.50	0.087
		82	9.5	—	369	—	78	—	273	1.27	12.05	0.083
		88	9.6	—	367	—	84	—	296	1.30	12.50	0.080
		92	10.2	—	392	—	86	—	344	1.28	13.10	0.076
		199	10.1	—	466	—	183	—	861	1.64	16.50	0.060
		200	9.4	—	450	—	186	—	787	1.68	16.00	0.063
		291	9.4	—	618	—	261	—	1516	1.73	16.30	0.061
		306	10.0	—	655	—	270	—	1768	1.70	17.00	0.059
	333	9.6	—	676	—	294	—	1908	1.77	17.00	0.059	
	0.5 ÷ 0.7	43	8.8	292	242	4	42	9	89	1.21	10.60	0.094
		66	8.9	327	296	13	64	40	169	1.28	11.40	0.088
		70	9.3	386	343	9	67	31	214	1.24	11.50	0.087
		85	8.8	347	307	2	82	7	221	1.36	12.00	0.083
		208	8.6	—	456	—	192	—	753	1.73	14.80	0.067
		296	8.8	—	623	—	267	—	1464	1.75	15.40	0.065
	1.6 ÷ 2.5	88	10.5	703	542	3	79	21	450	1.17	12.30	0.081
		179	10.4	708	564	4	160	37	938	1.39	14.50	0.069
		190	10.3	692	567	3	170	23	993	1.43	14.70	0.068
189		10.3	696	569	4	172	19	1008	1.43	14.7	0.068	
266		10.4	—	775	—	226	—	1821	1.41	14.70	0.068	
Вольфрам	0.1	74	6.5	306	256	9	73	18	121	1.39	9.09	0.109
		155	6.5	—	278	—	154	—	278	2.24	14.57	0.069
		180	6.7	—	302	—	178	—	360	2.44	16.32	0.061
		275	6.9	—	426	—	267	—	785	2.67	17.89	0.056
Свинец	2.0 ÷ 2.5	80	7.3	434	365	9	78	29	208	1.27	9.29	0.108
		155	7.4	—	476	—	147	—	517	1.44	10.72	0.093
		176	7.4	—	509	—	169	—	637	1.49	11.08	0.090
		211	7.2	—	551	—	202	—	801	1.57	11.37	0.088

по схеме, приведенной на рис. 1, б, регистрировали профили давления с помощью манганиновых датчиков давления [14], изготовленных в виде бифилярных спиралей диаметром 4.5 мм и толщиной 0.03 мм. Начальное сопротивление датчика 1.5 Ом. Импульсное питание датчиков выполнено по потенциометрической схеме и включалось за 10 мкс до момента прихода к ним фронта УВ. Каждый датчик имел четыре одинаковых вывода: одна пара служила для подачи питания на датчик напряжения, другая пара — для подачи регистрируемого сигнала на входы осциллографов HP54645D и TDS3052. Для изоляции датчиков использовали слюду толщиной 0.1 мм и эпоксидный клей. Общая толщина датчика составляла 0.25 мм. Давление ударного нагружения определяли по измененному электросопротивлению R датчика в сжатом состоянии. Для перехода от изменения сопротивления R/R_0 к давлению p использовали зависимость $p = p(R/R_0)$ из работы [15]. Как видно из рис. 1, б, такая постановка опытов позволяет с помощью первого датчика регистрировать в медном экране профили давления $p(t)$ в проходящей УВ ($p_{\text{экр}}$) и волне разрежения ($p_{\text{обр}}$), идущей от исследуемого материала, а с помощью второго датчика — профиль давления $p_{\text{обр}}$ на границе раздела экран — образец. Амплитуду давления изменяли путем варьирования мощности и толщины зарядов ВВ или материала слоистых экранов. Между частицами исследуемого материала находился воздух при нормальных условиях ($p = 100$ кПа).

Профили $p(t)$, зарегистрированные в разных опытах при различной интенсивности проходящей УВ, приведены на рис. 2, б, в. Как уже отмечалось, с помощью первого датчика измеряли давление в экране и волне разрежения, отраженной от образца с раздробленными частицами из ВНЖ-95 ($p_{\text{экр}}$ и $p_{\text{обр}}$ на рис. 2, б). С помощью второго датчика, установленного на границе раздела экран — образец, регистрировали давление в изолирующих прокладках из слюды и установившееся давление в образце ВНЖ-95 ($p_{\text{изол}}$ и $p_{\text{обр}}$ на рис. 2, в). Точность измерения давлений ± 5 %.

Положение экспериментальной точки в p - u -координатах определяли с использованием зависимости [16, 17] $u_{\text{пор}}^2 = u_0^2 + \frac{5}{6} \frac{p_{\text{пор}}}{\rho_0} (k - 1)$, где u_0 , $u_{\text{пор}}$ — массовая скорость сплошного и пористого материала, $p_{\text{пор}} = p_{\text{обр}}$ — давление в пористом материале, ρ_0 — плотность

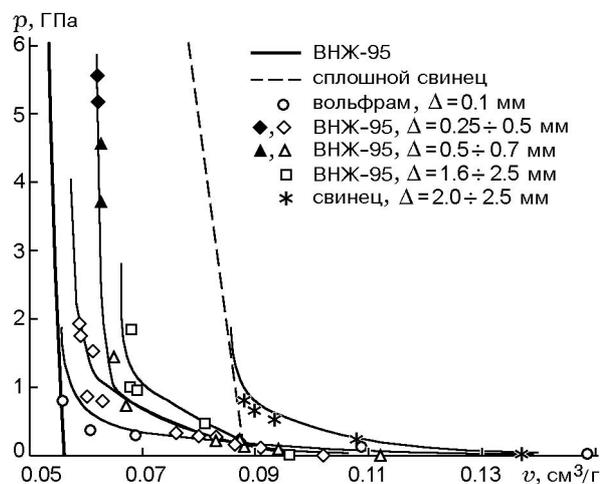


Рис. 4. Кривые сжатия исследуемых материалов:

светлые точки — нагружение по схеме рис. 1, а, темные — по схеме рис. 1, б

сплошного материала. Эта зависимость получена из условия, что при сжатии пористого материала ударной волной воздух в порах сжимается в соответствии с соотношением Гюгонио и достигается предельное сжатие $h = \gamma + 1/(\gamma - 1)$ ($\gamma = 1.4$ для воздуха). При вычислениях для сплошного материала ВНЖ-95 плотностью $\rho_0 = 18$ г/см³ использовали соотношение $D = 3.925 + 1.317u$ [18]. Результаты обработки экспериментальных данных на примере образцов из ВНЖ-95 с размерами частиц $\Delta = 0.25 \div 0.5$ и $0.5 \div 0.7$ мм приведены в табл. 3.

Результаты опытов, проведенных по схеме рис. 1, представлены на рис. 4. Анализ результатов (см. табл. 2, 3 и рис. 4), полученных при исследовании динамического поведения раздробленных материалов с различными размерами частиц ($\Delta = 0.25 \div 2.5$ мм), свидетельствует о немонотонной зависимости измеренных параметров от величины Δ . Так, скорость волны сжатия в раздробленном ВНЖ-95 слабо зависит от размера частиц в диапазоне $\Delta = 0.25 \div 0.7$ мм, а при увеличении размера частиц до $1.6 \div 2.5$ мм значение скорости волны сжатия заметно возрастает. Это связано, по-видимому, с зависимостью плотности начальной упаковки раздробленного материала от размеров и степени асимметрии его фрагментов (см. различия начальных плотностей в зависимости от размера частиц в табл. 2). Отметим, что скорости первых волн сжатия в исследуемых материалах составляют несколь-

Таблица 3

Δ , мм	ρ_{00} , г/см ³	$D_{2,пор}$, км/с	$u_{2,пор}$, м/с	$p_{2,пор}$, ГПа	k_{σ}	ρ , г/см ³	v , см ³ /г
0.25 ÷ 0.5	9.7	1.160	459	5.17	1.66	16.05	0.062
		0.200	477	5.56	1.66	16.10	0.062
		1.270	507	6.27	1.66	16.14	0.062
		1.370	550	7.30	1.67	16.22	0.062
		1.670	678	10.99	1.68	16.33	0.061
0.5 ÷ 0.7	9.7	0.990	387	3.72	1.64	15.93	0.063
		1.094	430	4.56	1.64	15.97	0.063
		1.260	498	6.09	1.65	16.05	0.062
		1.269	502	6.18	1.65	16.05	0.062
		1.345	534	6.97	1.66	16.09	0.062
		1.476	590	8.44	1.67	16.15	0.062

ко сотен метров в секунду. Возможно, это обусловлено отсутствием жесткой связи между частицами раздробленного материала. Кроме того, с увеличением размера частиц при прочих равных условиях сжатие уменьшается и кривые сжатия в p - v -координатах все дальше отстоят от аналогичной кривой для сплошного материала. Можно отметить также, что участки зависимостей $p(v)$, полученные с использованием различных схем нагружения и методик измерения (см. рис. 1), не противоречат друг другу.

Результаты опытов со свинцом свидетельствуют о том, что уменьшение прочности и увеличение пластичности материала частиц приводит к уменьшению давления полного компактирования (см. рис. 4).

Таким образом, с учетом полученных ранее результатов по ударно-волновому поведению современных демпферов тепловых и механических нагрузок типа диоксидциркониевой керамики ($k \geq 1.2$) и шамота ($k \geq 2$) [9, 19] удалось показать, что в области давлений ниже давления полного компактирования для пористых материалов с характерным размером частиц $\Delta \approx 0.2 \div 2.0$ мм, связанных (керамика) или не связанных (раздробленная среда) каркасом, наблюдаются соответственно трех- и двухволновая структуры волны сжатия. Аналогичное поведение отмечено при исследовании пресованных [5] и спеченных [10] порошков с характерным размером частиц $\Delta \leq 0.1$ мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г., Софронов В. А., Тюнькин Е. С. Особенности осесимметричного схождения откольных слоев в стальных цилиндрических оболочках // ПМТФ. 1984. № 3. С. 125–127.
2. Иванов А. Г., Огородников В. А., Тюнькин Е. С. Поведение оболочек под действием импульсной нагрузки. Малые возмущения // ПМТФ. 1992. № 3. С. 112–115.
3. Иванов А. Г., Огородников В. А., Карпенко Г. Я. и др. О влиянии сдвиговой прочности на развитие неустойчивости при торможении сходящихся оболочек // ПМТФ. 1994. № 4. С. 163–166.
4. Щетинин В. Г. Расчет ударного сжатия и разогрева пористых сред // Хим. физика. 1999. Т. 18, № 11. С. 79–81.
5. Boade R. R. Compression of porous copper by shock waves // J. Appl. Phys. 1968. V. 39, N 12. P. 2689–2694.
6. Boade R. R. Dynamic compression of porous tungsten // J. Appl. Phys. 1969. V. 40, N 9. P. 3781–3785.
7. Бодренко С. И., Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Исследование распространения ударных волн в пенополистироле // ПМТФ. 1979. № 6. С. 140–144.
8. Киселев С. П. О распространении ударной волны в пористом материале, возникающей при соударении пластин // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 4. С. 79–83.
9. Огородников В. А., Иванов А. Г., Ерунов С. В. и др. Ударно-волновое деформирование и разрушение диоксидциркониевой керамики различного фракционного состава и пори-

- стости // Физика горения и взрыва, 2001. Т. 37, № 6. С. 113–118.
10. **Boade R. R.** Principal Hugoniot, second-shock Hugoniot, and release behavior of pressed copper powder // J. Appl. Phys. 1970. V. 41, N 11. P. 4542–4551.
 11. **Минеев В. Н., Погорелов В. П., Иванов А. Г. и др.** Установка для исследования поведения конструкционных материалов и конструкций при динамических нагрузках // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 3. С. 129–133.
 12. **Иванов А. Г., Новиков С. А.** Метод емкостного датчика для регистрации мгновенной скорости движущейся поверхности // Приборы и техника эксперимента. 1963. № 1. С. 135–138.
 13. **Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П.** Физика ударных волн и высокотемпературных явлений. М.: Физматгиз, 1963.
 14. **Fuller P. J. A., Price J. H.** Electrical conductivity of manganin and iron at high pressures // Nature. 1962. V. 193. P. 262–268.
 15. **Павловский М. Н., Комиссаров В. В.** Особенности фазового превращения висмута в волне разрежения // Журн. эксперим. и теор. физики. 1982. Т. 83, № 6. С. 2146–2151.
 16. **Доронин Г. С., Ступников В. П.** О расчете ударных адиабат смесей и пористых материалов // Изв. Сиб. отд-ния АН СССР. 1970. № 3, вып. 1. С. 102–106.
 17. **Воскобойников Н. М., Афанасенков А. Н., Богомолов В. М.** Обобщенная ударная адиабата органических жидкостей // Физика горения и взрыва. 1967. Т. 3, № 4. С. 585–593.
 18. **Трунин Р. Ф.** Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
 19. **Огородников В. А., Хохлов Н. П., Ерунов С. В. и др.** Квазистатическое и ударно-волновое поведение перспективных демпферов механических и тепловых нагрузок // Труды междунар. конф. «V Харитоновские тематические научные чтения», Саров, 17–21 марта 2003 г.

Поступила в редакцию 31/V 2004 г.
