

5. R i n e h a r t J. S. Scabbing of metals under explosive attack: multiple scabbing. J. Appl. Phys., 1952, vol. 23, No. 11. (Рус. перев.: Сб. «Механика», 1953, № 4).
6. Р а й н х а р т Дж. С., П и р с о н Дж. Поведение металлов при импульсных нагрузках. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
7. K a t z S., D o r a n D. G., C u r r a n D. R. Hugoniot equation of state of aluminum and steel from oblique shock measurement. J. Appl. Phys., 1959, vol. 30, No. 4.
8. F o w l e s G. R. Shock wave compression of hardened and annealed 2024 aluminum. J. Appl. Phys., 1961, vol. 32, No. 8.

УДК 539.3

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПАРАФИНО-ВОЛЬФРАМОВЫХ СМЕСЕЙ

Ю. Ф. Алексеев, Л. В. Альтшулер, В. П. Крупникова

(Москва)

До давлений 2 мбар экспериментально зарегистрированы кривые ударного сжатия парафина и двух парафино-вольфрамовых смесей, содержащих 66.2 и 84.0 весовых процентов вольфрама. Показано, что во всем экспериментально обследованном диапазоне давлений смесевые ударные адиабаты удовлетворяют принципу аддитивности. Обращено внимание на большие перспективы применения метода утяжеляющих добавок для исследования легких сред при высоких ударных давлениях. Проанализированы критерии применимости принципа аддитивности.

Внесение в легкие среды дисперсных утяжеляющих добавок увеличивает их среднюю плотность, а следовательно, и давления в ударных волнах, возникающих при торможении ударников. Этот простой метод увеличения давлений, позволяющий существенно расширить экспериментальные возможности исследования сжимаемости легких соединений, был разработан и реализован авторами в начале пятидесятых годов. Независимый смесевой метод был развит А. Н. Дреминым и И. А. Карпухиным [1]. Некоторые его теоретические аспекты недавно были рассмотрены В. Н. Николаевским [2].

В основе смесевых методов лежит предположение о достаточно точном выполнении правила аддитивности. В аддитивном приближении объем ударносжатой смеси предполагается равным сумме объемов компонентов, полученных при том же давлении, при их отдельном ударном сжатии в виде однородных монолитных образцов. Это условие выражается соотношением

$$V_{12}(p) = \alpha_1 V_1(p) + \alpha_2 V_2(p) \quad (1)$$

Здесь p — давление, V_{12} — удельный объем смеси, V_1 и V_2 — удельные объемы легкого и тяжелого компонентов при ударном сжатии каждого из них порознь, α_1 и α_2 — их весовые концентрации ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$); двойной индекс 12 означает смесь. Уравнение (1) позволяет по адиабатам смеси и тяжелого компонента найти адиабату легкого компонента.

Обратимся к условиям, определяющим точность аддитивного приближения. Результаты динамических экспериментов устанавливают зависимость удельного объема смеси от давления и для каждого $p - V_{12}$ состояния определяют удельную энергию ударного сжатия

$$\epsilon_{12} = 1/2 p (V_{120} - V_{12})$$

Последнее уравнение может быть записано также в форме

$$\alpha_1 \epsilon_1^* + \alpha_2 \epsilon_2^* = 1/2 p [\alpha_1 (V_{10} - V_1^*) + \alpha_2 (V_{20} - V_2^*)] \quad (2)$$

Здесь ϵ_1^* и ϵ_2^* — удельные энергии сжатия компонентов, приобретенные при сжатии смеси, V_1^* и V_2^* — их удельные объемы в тех же условиях, V_{10} и V_{20} — их начальные удельные объемы.

Условие аддитивности требует соблюдения дополнительно к уравнению (2) полученных равенств

$$\epsilon_1^* = 1/2 p (V_{10} - V_1^*), \quad \epsilon_2^* = 1/2 p (V_{20} - V_2^*) \quad (3)$$

совпадающих с уравнениями Гюгоньо отдельных компонентов. При этом, как следует из системы (2), (3), справедливость одного из уравнений (3), одновременно свидетельствует о выполнении при сжатии смеси уравнения Гюгоньо и для другого компонента.

Уравнения (3), а следовательно, и (1) являются приближенными, потому что предполагают несуществующую в действительности полную тождественность процессов сжатия частиц, находящихся в гетерогенных смесях с ударным сжатием однородных компонент. Вполне точны они только для идеализированной ситуации, когда частицы одного из компонентов (например, тяжелого) являются несжимаемыми и нетеплопро-

водными. Для этой составляющей уравнение 3 выполняется из-за обращения в нуль энергии сжатия и разности начальных и конечных объемов. Уравнения (3) справедливы также для гипотетических материалов с нулевыми коэффициентами Грюнайзена, у которых при сжатии не возникает тепловых давлений. При всех термодинамических процессах как в смешанном, так и в монолитном состояниях удельные объемы в этом случае являются однозначными функциями давлений.

Для реальных веществ погрешности в определении ударной адиабаты одной из компонент (например, легкой) по ударной адиабате смеси тем меньше, чем меньше относительный объем, занимаемый другой фракцией, и доля энергии, приходящаяся на нее при ударном сжатии. Поэтому целесообразно применение максимально тяжелых и наименее сжимаемых добавок. Кроме того, для любых пар компонентов аддитивное приближение является более строгим при меньших ударных давлениях и менее точным при больших амплитудах ударных волн в условиях, когда ход кривых сжатия существенно зависит от энтропии.

С этими простыми соображениями не согласуются результаты [2], выраженные соотношениями

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^* &= \frac{1}{2} p (V_{10} - V_1) + \alpha_2 \frac{1}{2} p (V_{20} - V_{10} + V_2 - V_1) \\ \varepsilon_2^* &= \frac{1}{2} p (V_{20} - V_2) + \alpha_1 \frac{1}{2} p (V_{10} - V_{20} + V_1 - V_2) \end{aligned}$$

Как следует из этих уравнений, при ударном сжатии смесей всегда имеет место возрастание внутренней энергии компонента с меньшим начальным удельным объемом (и при том даже в случае его несжимаемости и нетеплопроводности). Что же касается легкой составляющей, то ее внутренняя энергия согласно [2] возрастает с давлением меньше, чем для адиабаты Гюгонно сплошного вещества, и, как показывают формулы, при достаточно больших концентрациях тяжелого компонента, может стать отрицательной. Эти парадоксальные выводы объясняются неправильным учетом в [2] сил межчастичного взаимодействия во фронте волны при предельном переходе к бесконечно-малой толщине фронта.

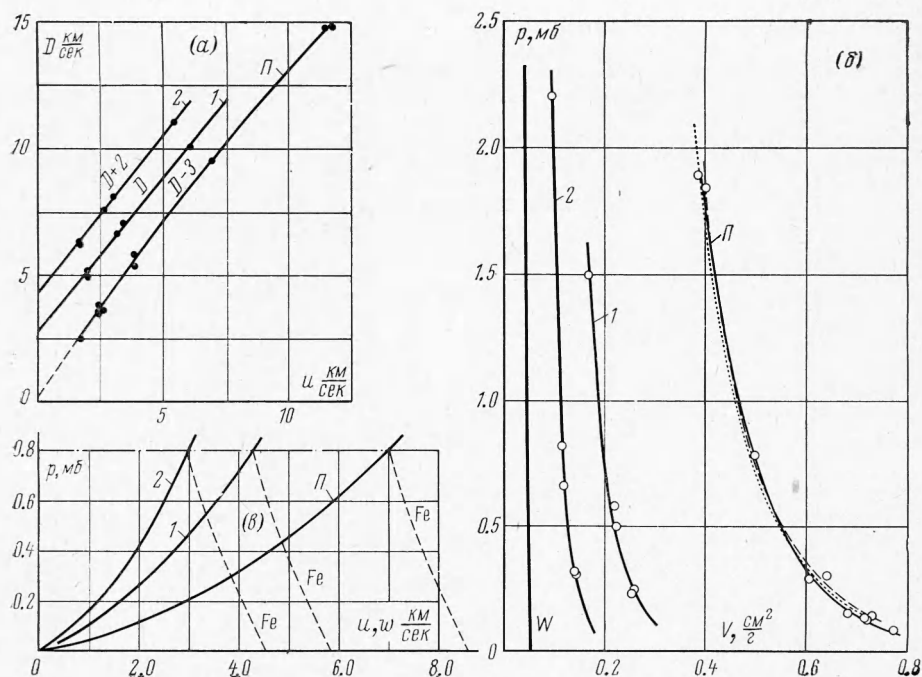
Для проведения экспериментальных исследований авторами были выбраны смеси парафина и вольфрама, т. е. вещества, очень сильно различающиеся по своей плотности и сжимаемости (по плотности в 21 раз и по сжимаемости примерно в 4 раза). Измерения в широком диапазоне давлений были осуществлены на чистом парафине (средней плотности 0.9 г/см^3) и на двух смесевых составах со следующими значениями средних плотностей $\rho \text{ г/см}^3$, весовых q и объемных Q концентраций вольфрама:

	ρ	$q\%$	$Q\%$
легкая смесь	2.44	66.2	8.4
тяжелая смесь	4.51	84.0	19.8

Результаты ударных экспериментов, выполненных по стандартной методике [3, 4], представлены в табл. 1 и на фиг. 1, а кривыми 1 и 2 для легкой и тяжелой смесей и П — для парафина. В таблице указаны: материал образца и его плотность $\rho \text{ г/см}^3$, материал и скорость ударников ω , создававших давление, волновые D и массовые U скорости, давления p и относительные плотности $\sigma = \rho / \rho_0$, т. е. все параметры, характеризую-

Таблица 1

$\rho, \text{ г/см}^3$	Ударник	$w, \text{ км/сек}$	$D, \text{ км/сек}$	$U, \text{ км/сек}$	$p, \text{ Мбар}$	σ	$V, \text{ см}^3/\text{г}$
$\rho_0 = 0.9$	Al	2.20	5.51	1.68	0.083	1.44	0.772
	Al	3.14	6.56	2.34	0.138	1.555	0.714
	Al	3.08	6.44	2.30	0.133	1.556	0.714
	Al	3.17	6.80	2.34	0.143	1.525	0.728
	Al	3.44	6.66	2.57	0.154	1.628	0.682
	Fe	4.56	8.40	3.82	0.289	1.834	0.606
	Al	5.30	8.86	3.78	0.302	1.745	0.637
	Fe	8.50	12.57	6.94	0.780	2.232	0.498
	Fe	14.40	17.79	11.45	1.835	2.805	0.396
	Fe	14.66	17.82	11.67	1.886	2.900	0.383
Легкая смесь $\rho_0 = 2.44$	Al	3.14	4.97	1.91	0.231	1.626	0.252
	Al	3.17	5.13	1.90	0.244	1.589	0.258
	Al	5.30	6.65	3.08	0.500	1.854	0.221
	Fe	4.56	7.06	3.32	0.574	1.888	0.217
	Fe	8.50	10.13	6.05	1.495	2.482	0.165
Тяжелая смесь $\rho_0 = 4.51$	Al	3.14	4.33	1.59	0.310	1.584	0.140
	Al	3.17	4.26	1.62	0.311	1.612	0.138
	Al	5.30	5.62	2.59	0.656	1.856	0.119
	Fe	4.56	6.12	2.95	0.816	1.931	0.115
	Fe	8.50	9.04	5.37	2.200	2.462	0.09



щие ударные состояния в образцах. Значения волновых скоростей получены усреднением результатов нескольких опытов. Массовые скорости находились при помощи графических построений на диаграммах давление — скорость, давления и плотности — по уравнениям законов сохранения $p = \rho_0 U D$ и $\rho = \rho_0 D (D - U)^{-1}$.

В DU -координатах полученные ударные адиабаты смесевых составов (и вольфрама по [4, 5]) описываются следующими линейными соотношениями:

$$D = 2.80 + 1.225 U \quad (\text{для легкой смеси}) \quad (4)$$

$$D = 2.32 + 1.26 U \quad (\text{для тяжелой смеси}) \quad (5)$$

$$D = 4.0 + 1.285 U \quad (\text{для вольфрама}) \quad (6)$$

На фиг. 1, б приведены pV -диаграммы смесевых составов и вольфрама, построенные по уравнениям (4) — (6). Для парафина здесь даны три зависимости. Одна из них (сплошная линия) является адиабатой Гюгоню, аппроксимирующей результаты прямых измерений ударной сжимаемости парафина. Ее параметры приведены в табл. 2. Другие две кривые найдены смесевым методом, путем подстановки в уравнение (1) удельных объемов вольфрама и легкой смеси (штриховая кривая), вольфрама и тяжелой смеси (пунктир).

Таблица 2

U , км/сек	D , км/сек	p , мбар	σ	V , см ³ /г	U , км/сек	D , км/сек	p , мбар	σ	V , см ³ /г
		0	1	1.111					
1.5	5.35	0.072	1.390	0.800	7.0	12.65	0.797	2.239	0.496
2.0	6.05	0.109	1.494	0.744	8.0	13.84	0.996	2.370	0.469
3.0	7.43	0.201	1.677	0.662	9.0	15.00	1.215	2.500	0.444
4.0	8.83	0.318	1.828	0.608	10.0	16.10	1.449	2.639	0.421
5.0	10.15	0.468	1.971	0.564	11.0	17.18	1.701	2.780	0.400
6.0	11.42	0.617	2.107	0.527	12.0	18.25	1.971	2.920	0.380

Как следует из хода кривых, адиабата парафина, полученная обычным способом, практически совпадает во всем экспериментально обследованном диапазоне давлений до 2 Мбар с адиабатами, найденными из экспериментов со смесевыми составами. Этот важный результат свидетельствует о справедливости принципа аддитивности в широком диапазоне термодинамических параметров и о больших перспективах приме-

ния метода утяжеляющих добавок для исследования легких сред при высоких давлениях.

Экспериментальные преимущества, получаемые при введении утяжеляющих примесей, очень значительны. Об этом можно судить на основании данных табл. 1 и по диаграмме давление — скорость (фиг. 1, *e*). На этой диаграмме нанесены адиабаты парафина, парафино-вольфрамовых смесей и кривые торможения железных ударников. Для получения информации о сжимаемости чистого парафина при давлении 800 кбар необходима скорость стального ударника в 8.6 км/сек, при использовании смеси с 66% W — 5.85 км/сек, при введении 84% вольфрама (объемное содержание $Q = 20\%$) — только 4.5 км/сек. Подобные скорости легко получаются на метательных устройствах простейших типов, описанных в [3-4].

Поступила 13 V 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Д р е м и н А. Н., К а р п у х и н И. А. Метод определения ударных адиабат для дисперсных веществ. ПМТФ, 1960, № 3.
2. Н и к о л а е в с к и й В. Н. Гидродинамический анализ ударных адиабат гетерогенных смесей веществ. ПМТФ, 1969, № 3.
3. А л ь т ш у л е р Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Усп. физ. н., 1965, т. 85, вып. 2.
4. Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М., «Мир», 1965.
5. К р у п н и к о в К. К., Б р а ж н и к М. И., К р у п н и к о в а В. П. Ударное сжатие пористого вольфрама. ЖЭТФ, 1962, т. 42, вып. 3.

УДК 539.3

КРИВАЯ СЖАТИЯ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА

С. Т. Милейко, А. А. Хвостунков

(Москва)

Приводятся результаты экспериментального исследования однонаправленного волокнистого композита при сжатии в направлении армирования. Обнаружены две формы потери устойчивости: обычная изгибная и сдвиговая, которая имеет место при сравнительно малых гибкостях образца.

1. Экспериментальное определение механических свойств материалов при сжатии имеет ряд особенностей, затрудняющих иногда получение надежных результатов. Прежде всего, сравнительно короткая рабочая длина образца делает напряженное состояние далеким от однородного, а измерение перемещений менее надежным, чем в случае растяжения. Увеличение рабочей длины приводит к выпучиванию образца. При сжатии волокнистых материалов могут появиться дополнительные особенности.

Во-первых, возможна потеря устойчивости системы армирующих волокон в матрице. В [1] энергетический критерий устойчивости применен к плоской модели композита — показано, что при малых концентрациях арматуры энергетически выгодным является такое выпучивание системы жестких армирующих плоскостей; что любые две соседние плоскости изгибаются в противофазе, на основное напряженное состояние матрицы накладывается растяжение — сжатие в направлении, перпендикулярном основному сжатию. С ростом процента армирования более выгодным становится выпучивание армирующей системы в одной фазе, при этом на основное состояние матрицы накладывается сдвиг. Практически тот же результат получен в [2] с помощью статического критерия. По-видимому, для обычных сочетаний компонент и величин объемных долей арматуры более характерной должна быть синфазная форма потери устойчивости. Для этого случая в [1, 2] получено выражение для критического напряжения в армирующем элементе

$$\sigma_{*'} = \frac{G_m}{v_f v_m} \quad (1.1)$$