

**ВЫПОЛНЕНИЕ ПРАВИЛА АДДИТИВНОСТИ ДЛЯ РЯДА СПЛАВОВ ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ**

*А. А. Баканова, И. П. Дудолодов, Ю. Н. Сутулов*

(Москва)

В статье приведены результаты экспериментального исследования ударной сжимаемости четырех двухкомпонентных сплавов в интервале давлений от 200 кбар до 5 Мбар. Во всем обследованном интервале давлений кривые ударного сжатия этих сплавов в пределах экспериментального разброса совпадают с адиабатами Гюгонио, рассчитанными из ударных адиабат компонент в аддитивном приближении [1-3].

Показано, что аддитивно построенные адиабаты описывают также опытные данные для ранее исследованных [4-6] сплавов железа с никелем, латуни и двух химических соединений: карбида вольфрама и карбида тантала.

До сих пор аддитивность термодинамических параметров для области высоких давлений рассматривалась только применительно к макроскопическим гетерогенным смешанным составам [1-3].

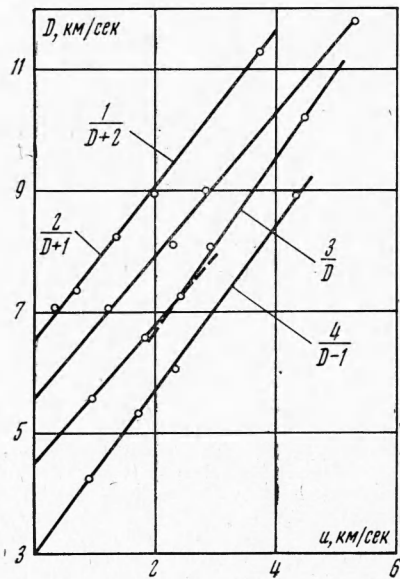
*Методика исследования и результаты.* В качестве объектов исследования были выбраны сплавы ниобия с 5 и 30% тантала (вес) — НТ5Э и НТ30Э соответственно, рения с молибденом (40% Мо и 60% Re, вес) и титана с молибденом (30% Мо и 70% Ti, вес). Все эти сплавы принадлежат к системам, образующим непрерывный ряд твердых растворов.

При определении кривых ударного сжатия этих сплавов использовался метод отражения, подробно изложенный в [6, 7].

Ударные волны с известной интенсивностью ( $P_*$  — давление и  $U_*$  — массовая скорость) подводились к экранам из алюминия или железа,

Таблица 1.

Исследуемый сплав	Материал экрана	$U_*$ , км/сек	$D$ , км/сек	$U$ , км/сек	$P$ , Мбар	$\sigma$	$V$ , см <sup>3</sup> /г
(НТ5Э) Nb—Ta $\rho_0 = 8.79$ г/см <sup>3</sup>	Алюминий	1.51	5.57	0.94	0.46	1.203	0.0947
	Алюминий	2.76	6.57	1.80	1.04	1.377	0.0826
	Железо	2.45	7.27	2.42	1.55	1.499	0.0759
	Железо	4.52	10.23	4.48	4.03	1.779	0.0639
	Железо	2.95	8.07	2.90	2.06	1.560	0.0729
(НТ30Э) Nb—Ta $\rho_0 = 9.93$ г/см <sup>3</sup>	Алюминий	1.51	5.25	0.90	0.47	1.207	0.0835
	Алюминий	2.76	6.35	1.71	1.08	1.368	0.0736
	Железо	2.45	7.06	2.32	1.63	1.489	0.0676
	Железо	4.52	9.92	4.32	4.26	1.771	0.057
Re—Mo $\rho_0 = 14.71$ г/см <sup>3</sup>	Алюминий	0.69	5.08	0.26	0.19	1.054	0.0645
	Алюминий	1.51	5.36	0.68	0.54	1.145	0.0591
	Алюминий	2.76	6.24	1.35	1.24	1.276	0.0533
	Железо	2.45	6.95	1.96	2.00	1.393	0.0488
	Железо	4.49	9.36	3.70	5.09	1.654	0.041
Ti—Mo $\rho_0 = 5.24$ г/см <sup>3</sup>	Алюминий	1.51	6.06	1.20	0.38	1.247	0.153
	Алюминий	2.76	7.12	2.28	0.85	1.471	0.130
	Железо	2.45	8.03	2.82	1.19	1.541	0.124
	Железо	4.52	10.79	5.26	2.97	1.951	0.098



Фиг. 1

удельные объемы  $V$ , материалы экранов и массовые скорости  $U_*$  в них. Динамические адиабаты железа и алюминия, использованные в качестве экранов, описываются в  $D-U$ -координатах соотношениями [8, 10]

$$D = 5.25 + 1.39U \text{ (Al)}, \quad D = 3.85 + 1.615U \text{ (Fe)}$$

**Обсуждение результатов.** Полученные опытные данные графически изображены на диаграммах волновая — массовая скорости на фиг. 1 (1 и 2 сплавы Re—Mo и Ti—Mo, 3 и 4 — сплавы Nb—Ta соответственно НТ5Э и НТ30Э; пунктиром изображены экстраполированные участки  $D-U$ -соотношений).

В  $D-U$ -координатах экспериментальные данные описаны следующими линейными соотношениями, коэффициенты которых определялись методом наименьших квадратов.

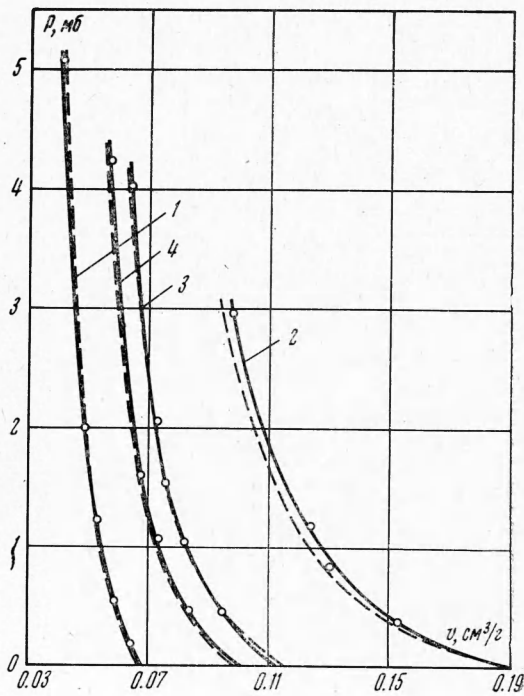
Для сплавов НТ30Э, Re—Mo, Ti—Mo соответственно имеем  $D = 4.00 + 1.365U$ ,  $D = 4.53 + 1.289U$ ,  $D = 4.60 + 1.176U$ .

Для сплава НТ5Э они располагаются на двух прямых разного наклона

$$D = 4.48 + 1.157U \quad (0 \leq U \leq 2.45), \quad D = 3.81 + 1.430U \quad (2.45 \leq U \leq 4.5)$$

прикрывающим исследуемые образцы. В экспериментах фиксировались скорости ударных волн в изучаемых образцах  $D$ . Искомые термодинамические характеристики — давление, энергия ударного сжатия и плотность вещества за фронтом ударной волны, находились по значениям  $D$  в образцах и параметрам  $P_*$  и  $U_*$  с помощью законов сохранения массы, количества движения и условий равенства давлений и скоростей на границе образец — экран. Давления, реализуемые в исследуемых сплавах, создавались с помощью взрывных устройств, описанных в [8, 9].

Зарегистрированные в опытах характеристики ударного сжатия в изучаемых сплавах представлены в табл. 1. Здесь приведены начальные плотности  $\rho_0$  и волновые скорости  $D$  в образцах и соответствующие им значения массовых скоростей  $U$ , давления динамического сжатия  $P$ , относительные сжатия  $\sigma = \rho/\rho_0$ ,



Фиг. 2

Рассчитанные из этих  $D - U$ -зависимостей адиабаты Гюгонио изображены на  $P - V$ -диаграммах (фиг. 2) сплошными линиями.

При изучении сплавов ниобия с танталом для двух соотношений компонент предполагалось выяснить влияние величины добавки тантала на зафиксированную в ниобии перестройку электронной структуры, происходящую под действием высоких давлений [10, 11]. Наличие в  $D - U$ -зависимости сплава с 5% тантала излома, характерного для металлов, испытывающих электронные переходы и отсутствие его у сплава с 30% тантала, свидетельствуют о том, что малая добавка тантала (5%) к ниобию не изменяет характера сжатия. На адиабате сплава НТ5Э, как и у ниобия, наблюдается излом, сопровождающийся уменьшением сжимаемости.

Добавка 5% Та к Nb несколько изменяет критические параметры, при которых осуществляется электронный переход. Для сплава НТ5Э они имеют значения  $P^* = 1,55 \text{ Мбар}$ ,  $U^* = 2,45 \text{ км/сек}$ , для Nb по [10]  $P^* = 860 \text{ кбар}$ ,  $U^* = 1,62 \text{ км/сек}$ .

Следует заметить, что для сплава НТ5Э эти параметры менее определены, чем у Nb из-за меньшего количества экспериментов.

В предположении, что в сплавах, так же как и в механических смесях [1, 2] соблюдается правило аддитивности, были рассчитаны кривые динамических адиабат по соотношению

$$V_{12}(P) = \alpha_1 V_1(P) + (1 - \alpha_1) V_2(P) \quad (1)$$

Здесь  $\alpha_1$ ,  $(1 - \alpha_1)$  — весовые концентрации первой и второй компонент сплава,  $V_1(P)$  и  $V_2(P)$  — удельные объемы первой и второй компонент сплава на индивидуальных ударных адиабатах металлических образцов при давлении  $P$ ,  $V_{12}(P)$  — удельный объем сплава при давлении  $P$ .

В этом приближении предполагается одинаковая степень сжатия каждой компоненты при раздельном ударном сжатии в монолитных образцах и в сплавах при одинаковых давлениях.

Рассчитанные по (1) аддитивные адиабаты сплавов изображены на фиг. 2 пунктирными линиями. Кривые ударного сжатия компонент сплавов Та, Nb, Ti, Mo, Re опубликованы в работах [6, 10-13].

На  $D - U$ -диаграммах адиабаты этих металлов аппроксимируются соотношениями вида

$$D = C_0 + \lambda U \quad (2)$$

Та ( $\rho_0 = 16,38 \text{ г/см}^3$ ),	$D = 3,29 + 1,326U$	$(0 < U < 6,0)$
Nb ( $\rho_0 = 8,58 \text{ г/см}^3$ ),	$D = 4,70 + 0,920U$	$(0 < U < 1,62)$
	$D = 3,91 + 1,409U$	$(1,62 < U < 4,5)$
Ti ( $\rho_0 = 4,50 \text{ г/см}^3$ ),	$D = 4,81 + 1,126U$	$(0 < U < 9,5)$
Mo ( $\rho_0 = 10,20 \text{ г/см}^3$ ),	$D = 5,14 + 1,267U$	$(0 < U < 7,0)$
Re ( $\rho_0 = 21,02 \text{ г/см}^3$ ),	$D = 4,03 + 1,414U$	$(0 < U < 4,0)$

Как показывает фиг. 2, для трех исследованных сплавов во всем исследованном интервале давлений имеет место согласие между кривыми, рассчитанными в аддитивном приближении и опытными адиабатами.

Небольшое расхождение расчетных и экспериментальных данных ( $\sim 3\%$ ) наблюдается в области давлений 3 Мбар у сплава Ti — Mo. Однако это различие не выходит за границы вероятных ошибок, обусловленных экспериментальными неточностями адиабаты сплава и адиабат компонент.

Возможность выполнения соотношения (1) была проверена также для двух химических соединений (карбидов вольфрама (WC) и тантала (TaC) и сплавов (железа с никелем (10% и 26% Ni, вес), железа с кремнием (4% и 19,8% Si, вес) и латуни). Поведение под действием ударного сжатия до

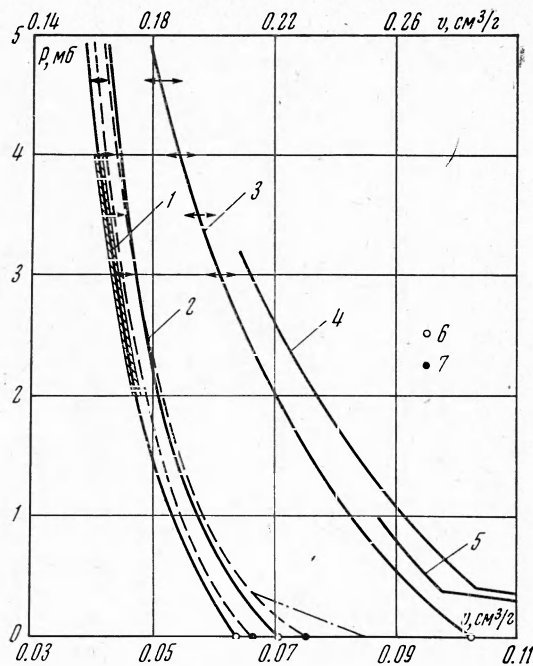
давлений 5 Мбар для TaC и WC было прослежено в [4], а для указанных сплавов — в работах [5,6,14].

На фиг. 3 сплошными кривыми 1 и 2 представлены динамические адиабаты WC (1) и TaC (2) по [4] вместе с аддитивными адиабатами (пунктир), найденными путем подстановки в уравнение (1) объемов Ta по (2), W из [6,15,16] и углерода, взятого по [17]. Ударные адиабаты для W и алмаза по уравнению (2)

$$\begin{aligned} W (\rho_0 = 19.17 \text{ г/см}^3) \quad D = 3.97 + 1.27U \quad (0 < U < 4.0) \\ \text{Алмаз } (\rho_0 = 3.51 \text{ г/см}^3), \quad D = 12.16 + 1.00U \quad (0 < U < 8.0) \end{aligned}$$

Особо следует остановиться на кривой ударного сжатия легкой компоненты этих соединений — углерода.

В [17,18] исследовалась ударная сжимаемость обеих модификаций углерода — алмаза до давлений  $\sim 6$  Мбар и графита до  $\sim 3$  Мбар. Ход кривых сжатия алмаза и графита с



Фиг. 3

двумя различными начальными плотностями  $\rho_{00}$  представлен в правой части фиг. 3 кривыми 3—5 (3 — алмаз из [17], 4 и 5 — графит по [18] соответственно для  $\rho_{00} = 1.75 - 1.85 \text{ г/см}^3$  и  $\rho_{00} = 2.23 \text{ г/см}^3$ ).

Верхняя шкала фиг. 3 относится к графиту и алмазу, а нижняя — к WC и TaC. При расчете кривых ударного сжатия по уравнению (1) для TaC и WC в качестве легкой компоненты принималась экспериментальная адиабата алмаза, прослеженная до больших давлений. Как показали расчеты, использование «алмазного» участка ударной адиабаты графита [18] с  $\rho_{00} = 2.23 \text{ г/см}^3$ , близкой к кристаллографической ( $\rho_0 = 2.26 \text{ г/см}^3$ ), приводит к незначительному смещению расчетной кривой в сторону больших удельных объемов на весьма

малую величину  $\Delta V = 0.0006 \div 0.0003 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Как следует из графика для TaC, при давлениях выше 1 Мбар имеет место точное описание эксперимента аддитивной кривой, построенной по адиабатам тантала и алмаза. Для карбида вольфрама отличие аддитивно построенной от опытной кривой во всем диапазоне давлений составляет по объему  $\sim 3\%$ .

При давлении ниже фазового перехода графита ( $P < 390 \text{ кбар}$ ) аддитивная адиабата TaC отличается от экспериментальной на 6%. Отметим, что, если в качестве ударной адиабаты легкой компоненты используется адиабата графита, а не алмаза, наблюдается резкое отклонение расчетной кривой, показанной для TaC на фиг. 3 штрих-пунктиром. Стрелками на фиг. 3 показаны границы вероятного экспериментального разброса адиабаты анализа и вероятные ошибки в положении расчетной аддитивной адиабаты WC, обусловленные неточностями адиабат компонент. Запунктированный участок — вероятные погрешности экспериментальной кривой

сжатия WC, 6, 7 — начальные удельные объемы реальных материалов и рассчитанные по уравнению (1) с адиабатой легкой компоненты — алмаза [17].

Результаты сопоставления аддитивных ударных адиабат для сплавов Fe — Ni (10 и 26% Ni, вес), Fe — Si (4 и 19.8% Si и 0.3—0.4% W для обоих сплавов) и латуни (весовой состав Cu : Zn : Pb : Fe = 61.5 : 36 : 0.25 : 0.05) с экспериментальными адиабатами, полученными в работах [5, 6, 14], представлены в табл. 2. ( $V_1$  и  $V_2$  — расчетные и экспериментальные объемы). Необходимые динамические адиабаты компонент этих сплавов приведены в [19, 20].

Таблица 2

Наименование сплава	$P$ , Мбар	$V_2$ , см <sup>3</sup> /г	$V_1$ , см <sup>3</sup> /г	$\frac{V_1 - V_2}{V_2}$ , %
Латунь [6] $\rho_0 = 8.44$ г/см <sup>3</sup>	0	0.1184	0.1216	2.7
	0.25	0.1024	0.1032	0.8
	0.50	0.0942	0.0945	0.3
	1.0	0.0842	0.0855	1.5
	1.5	0.0788	0.0800	1.5
	2.0	0.0748	0.0760	1.5
Железоникелевый сплав [5] (Ni — 18%, вес) $\rho_0 = 7.96$ г/см <sup>3</sup>	0	0.1257	0.1247	1
	0.5	0.0992	0.0982	1.0
	1.0	0.0923	0.0915	0.9
	1.5	0.0870	0.0865	0.6
	2.0	0.0828	0.0824	0.5
Железоникелевый сплав [5] (Ni — 26%, вес) $\rho_0 = 7.97$ г/см <sup>3</sup>	0	0.1255	0.1236	1.5
	0.5	0.0994	0.0978	1.6
	1.0	0.0920	0.0909	1.2
	1.5	0.0866	0.0860	0.7
	2.0	0.0821	0.0823	0.2
Железкремниевый сплав [15] (Si — 4%, вес) $\rho_0 = 7.646$ г/см <sup>3</sup>	0	0.1309	0.1394	—
	0.5	0.1058	0.1074	1.5
	1.0	0.0959	0.0981	2.3
	1.5	0.0898	0.0925	2.7
	2.0	0.0864	0.0897	3.8
Железкремниевый сплав [15] (Si — 19.8%, вес) $\rho_0 = 7.016$ г/см <sup>3</sup>	0	0.1426	0.1865	—
	0.5	0.1202	0.1297	7.9
	1.0	0.1091	0.1189	9.0
	1.5	0.1007	0.1132	12.4
	2.0	0.0950	0.1097	15.5

Сравнение расчетных и опытных данных для сплавов (табл. 1) показывает, что аддитивный принцип расчета нарушается здесь только для сплавов Fe—Si, расчетная адиабата которого отличается от эксперимента [14] на 7—13% для сплава с 20% Si и на 3% для сплава с 4% Si. У латуни и железоникелевых сплавов отклонение прогнозируемых кривых от опытных в среднем составляет 1%. Чем обусловлено значительное расхождение для железокремниевых сплавов, однозначно ответить трудно.

Результаты выполненных исследований показали, что для ряда сплавов и химических соединений, так же как для смесей и растворов [1, 2, 21], возможно расчетным путем довольно точно определить ход адиабат Гюгонио, исходя из ударной сжимаемости отдельных компонент. Представляется интересным в дальнейшем значительно расширить подобные исследования на целом ряде других химических соединений и сплавов.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Дремин А. Н., Карпухин И. А. Метод определения ударных адиабат для дисперсных веществ. ПМТФ, 1960, № 3.
2. Алексеев Ю. Ф., Крупникова В. П., Альтшулер Л. В. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей. ПМТФ, 1971, № 3.
3. Альтшулер Л. В., Шарипджанов И. И. Аддитивные уравнения состояния силикатов при высоких давлениях. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1971, № 3, стр. 11.
4. Павловский М. Н. Ударная сжимаемость шести высокотвердых веществ. Физика твердого тела, 1970, т. 12, вып. 7.
5. McQueen R. G., Marsh S. P. Shock-wave compression of iron — nickel alloys and the earth's core. J. Geophys. Res., 1966, vol. 71, No. 6.
6. McQueen R. G., Marsh S. P. Equation of state for nineteen metallic elements from shock-wave, measurements to two megabars. J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, No. 7.
7. Альтшулер Л. В., Крупников К. К., Бражник М. И. Динамическая сжимаемость металлов при давлениях от четырехсот тысяч до четырех миллионов атмосфер. ЖЭТФ, 1958, т. 34, вып. 4.
8. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений. ЖЭТФ, 1960, т. 38, вып. 3.
9. Альтшулер Л. В., Павловский М. Н., Кулешова Л. В., Симанков Г. В. Исследование галогенидов щелочных металлов при высоких давлениях и температурах ударного сжатия. Физика твердого тела, 1963, т. 5, вып. 1.
10. Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Дудолов И. П. Влияние электронной структуры на сжимаемость металлов при высоких давлениях. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 6.
11. Альтшулер Л. В., Баканова А. А. Электронная структура и сжимаемость металлов при высоких давлениях. Усп. физ. н., 1968, т. 96, вып. 2.
12. Крупников К. К., Баканова А. А., Бражник М. И., Трунин Р. Ф. Исследование ударной сжимаемости титана, молибдена, тантала и железа. Докл. АН СССР, 1963, т. 148, № 6.
13. Walsh J. M., Rice M. H., McQueen R. G., Yarger F. L. Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals. Phys. Rev., 1957, vol. 108, No. 2.
14. Balchan A. S., Cowan G. K. Shock compression of two iron-silicon alloys to 2.7 megabars. J. Geophys. Res., 1966, vol. 71, No. 14.
15. Крупников К. К., Бражник М. И., Крупникова В. П. Ударное сжатие пористого вольфрама. ЖЭТФ, 1962, т. 42, вып. 3.
16. Jones A. H., Isbell W. M., Maiden C. J. Measurement of the very-high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, No. 9.
17. Павловский М. Н. Ударное сжатие алмаза. Физика твердого тела, 1971, т. 13, вып. 3.
18. Павловский М. Н., Дракин В. П. К вопросу о металлической фазе углерода. Письма в ЖЭТФ, 1966, т. 4, вып. 5.
19. Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Ударные адиабаты и нулевые изотермы семи металлов при высоких давлениях. ЖЭТФ, 1962, т. 42, вып. 1.
20. Павловский М. Н. Образование металлических модификаций германия и кремния в условиях ударного сжатия. Физика твердого тела, 1967, т. 9, вып. 11.
21. Альтшулер Л. В., Павловский М. Н. Исследование глины и глинистого сланца при сильных динамических воздействиях. ПМТФ, 1971, № 1.