

ЛИТЕРАТУРА

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Изд. 8-е. М.: Наука, 1977.
2. Станюкович К. П. Неуставившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971.
3. Коробейников В. П., Мельникова Н. С., Рязанов Е. В. Теория точечного взрыва. М.: Физматгиз, 1961.
4. Кестенбойм Х. С., Росляков Г. С., Чудов Л. А. Точечный взрыв. М.: Наука, 1974.
5. Годунов С. К., Забродин А. В. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
6. Броуд Г. Расчеты взрывов на ЭВМ. М.: Мир, 1976.
7. Черный Г. Г. Адиабатические движения совершенного газа с ударными волнами большой интенсивности. — Изв. АН СССР. ОТН, 1957, № 3.
8. Охотимский Д. Е., Кондрашева И. Л. и др. Расчет точечного взрыва с учетом противодействия. — Труды МИАН СССР, 1957, т. 50, с. 1.
9. Коробейников В. П., Чупкин П. И. Метод расчета точечного взрыва в газах. — ДАН СССР, 1964, т. 154, № 3.
10. Коробейников В. П., Шидловская Л. В. Численное решение задач о взрыве в движущемся газе. — Численные методы механики сплошной среды, 1975, т. 6, № 4.
11. Андрианкин Э. И. Соударение двух пластин с большой скоростью. — ПМТФ, 1963, № 4.
12. Подлубный В. В., Фонарев А. С. Отражение сферической волны от плоской поверхности. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 6.
13. Андрианкин Э. И. О влиянии лучистой теплопроводности на течение газа при сильном взрыве. — ИФЖ, 1961, т. 4, № 11.
14. Андрианкин Э. И. Распространение неавтономной тепловой волны. — ЖЭТФ, 1958, т. 35, вып. 2 (8).
15. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматгиз, 1963.

УДК 536.242 : 546.3

**ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОГО СЖАТИЯ
ЖИДКОГО ОЛОВА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ
ДО 100 ГПа И НАЧАЛЬНЫХ
ТЕМПЕРАТУРАХ 310...475°C**

К. В. Волков, В. А. Сибилев

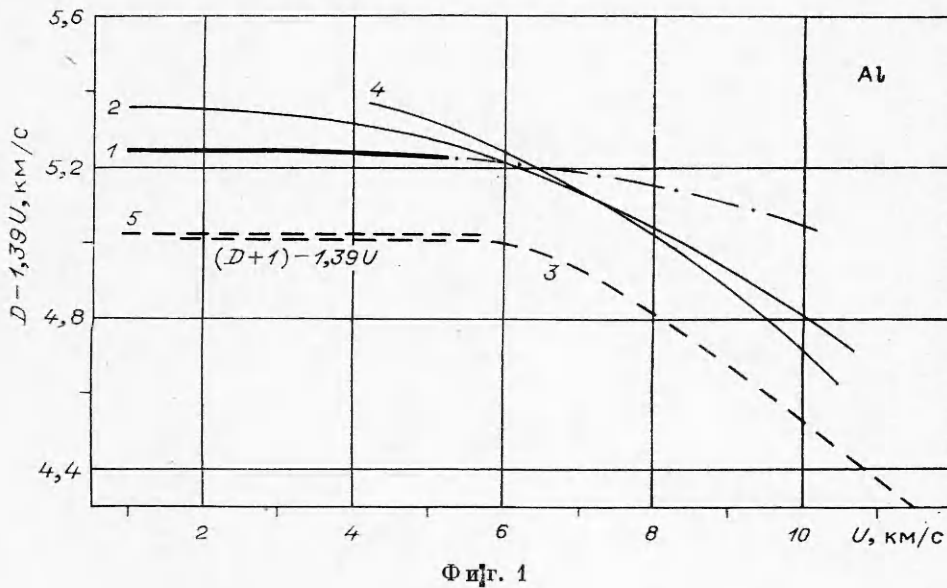
Вопрос о плавлении веществ при ударном сжатии и об уравнении состояния жидкой фазы рассматривается в [1—4]. Многочисленные экспериментальные данные по изучению динамической сжимаемости различных веществ до 1 ТПа, например [5—7], показывают, что плавление в ударной волне слабо влияет на ход ударной адиабаты в координатах $p - U$, $p - V$ (p — давление, U — массовая скорость, V — удельный объем). Экспериментальные данные вплоть до давлений 0,1—0,15 ТПа хорошо описываются линейной зависимостью $D - U$. При более высоких давлениях наблюдается уменьшение наклона зависимости $D - U$, что связывают с плавлением в ударной волне [3], причем зависимость $D - U$ в области жидкой фазы представляют в виде прямой, но с меньшим наклоном, чем для твердой фазы. Однако следует заметить, что по имеющимся экспериментальным точкам с равным успехом можно провести зависимость $D - U$ с плавно уменьшающимся наклоном. Такие попытки имели место (см., например, [8]). С другой стороны, в [3] отмечается, что плавное уменьшение наклона зависимости $D - U$ может быть связано с увеличением вклада электронной составляющей в уравнение состояния при высоких температурах. Таким образом, затруднительно сделать какой-либо определенный вывод о влиянии собственно плавления на ход зависимости $D - U$. Информацию на этот счет можно в принципе получить, имея экспериментальные зависимости $D - U$ начально твердой и начально жидкой фаз. Известна лишь одна работа по исследованию ударного сжатия жидкого металла — ртути [9]. Сравнительных данных по ударному нагружению начально жидкой и начально твердой фаз металлов, по имеющимся у нас сведениям, нет.

Таблица 1

	ρ , г/см ³	$p \cdot 10^{-4}$, ГПа	$D \cdot 10^{-6}$, см/с	$U \cdot 10^{-6}$, см/с	$E \cdot 10^{-10}$, эрг/г	$T \cdot 10^{-3}$, К
Ударная адиабата твердого Al	3,208	0,187	0,678	0,101	0,351	0,298
	3,822	0,612	0,886	0,253	3,044	1,388
	4,368	1,260	1,109	0,416	8,494	4,276
	4,914	2,254	1,363	0,606	18,190	9,664
	5,460	3,679	1,642	0,821	33,536	17,658
	6,000	5,603	1,941	1,058	55,772	28,003
Ударная адиабата жидкого Al с $\rho_{ож}$, $E_{ож}$	2,866	0,232	0,643	0,172	3,648	3,354
	3,344	0,576	0,859	0,320	7,276	6,022
	4,095	1,589	1,246	0,607	20,607	14,601
	4,368	2,140	1,401	0,727	28,628	19,191
	4,914	3,613	1,733	0,993	51,438	30,701
	5,187	4,574	1,913	1,138	66,982	37,633
Ударная адиабата жидкого Al с $\rho_{от}$, $E_{от}$	4,368	1,289	1,122	0,421	9,014	3,467
	4,914	2,277	1,370	0,609	18,690	9,078
	5,460	3,647	1,634	0,817	33,555	17,262
	6,000	5,439	1,912	1,042	54,452	27,577
Ударная адиабата твердой меди	10,977	0,494	0,548	0,101	0,432	0,557
	12,571	1,264	0,701	0,201	1,951	2,248
	13,890	2,339	0,858	0,304	4,557	5,880
	16,058	5,475	1,176	0,520	13,429	18,916
	17,473	8,773	1,418	0,691	23,778	32,912
Ударная адиабата жидкой меди с $\rho_{ож}$, $E_{ож}$	10,977	1,137	0,673	0,238	4,247	10,411
	12,571	2,360	0,874	0,380	8,654	18,913
	13,890	3,917	1,062	0,519	14,906	29,710
	15,525	6,743	1,323	0,718	27,190	47,946
Ударная адиабата жидкой меди с $\rho_{от}$, $E_{от}$	13,266	1,785	0,783	0,254	3,808	3,231
	15,002	3,612	1,000	0,403	8,193	11,643
	16,551	6,062	1,214	0,557	15,590	24,006
	17,918	8,976	1,416	0,708	25,118	38,274

1. Расчет ударных адиабат Al и Cu и оценка ударной адиабаты жидкого Sn. На основе предлагаемых в [3] полуэмпирических уравнений состояния сделан расчет ударных адиабат начально твердой и жидкой фаз Al и Cu. Начальное состояние жидких фаз бралось при $t = 2000^\circ\text{C}$ для Al ($\rho_{ож} \approx 2,1$ г/см³, $E_{ож} \approx 217 \cdot 10^8$ эрг/г) и при $t = 2500^\circ\text{C}$ для Cu ($\rho_{ож} \approx 7,1$ г/см³, $E_{ож} \approx 142 \cdot 10^8$ эрг/г). Большой перегрев выше температуры плавления был взят затем, чтобы полнее выявить различие в ходе ударных адиабат твердой и жидкой фаз, в частности, в наклоне зависимостей $D-U$. Проведен также расчет по уравнению состояния жидкой фазы для начально твердого состояния Al и Cu (табл. 1).

На фиг. 1 (в таких же координатах, что и в [3]) приведены зависимости для Al (1 — экспериментальная зависимость [10]; 2 — расчет для твердой фазы; 3 — расчет для жидкой фазы с $\rho_{ож}$, $E_{ож}$; 4 — расчет для жидкой фазы с $\rho_{от}$, $E_{от}$; 5 — приближенная оценка для начально жидкой фазы, см. ниже). Заметим, что зависимость 4 совпадает с аналогичной зависимостью из [3], тогда как зависимость для твердой фазы 2 имеет несколько иной вид, чем в [3] («перегретая» твердая фаза из [3] показана штрихпунктиром).



Из расчетов следует, что зависимости $D - U$ для начально жидкой фазы Al и Sn лишь сдвигаются относительно зависимостей $D - U$ для начально твердой фазы, повторяя их ход. Наклон их одинаков во всем диапазоне давлений, а уменьшение наклона с ростом давлений проявляется в равной степени для обеих фаз.

Данных по уравнению состояния жидкого Sn в [3] не имеется, поэтому его ударная адиабата найдена по ударной адиабате твердой фазы из следующих простых оценок, применимость которых проверена сравнением с приведенным выше точным расчетом для Al.

Можно рассматривать твердую и жидкую фазы как самостоятельные вещества, каждое со своей начальной плотностью ρ_0 и начальной скоростью звука $c_0 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s^{1/2}$, и воспользоваться уравнением ударной адиабаты, например известным уравнением с предельной плотностью [11]

$$(1.1) \quad p(\sigma) = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} \frac{\sigma^n \left(h - \frac{n+1}{n-1} \right) + \sigma \frac{2n}{n-1} - (h+1)}{h - k\sigma},$$

беря в первом приближении n и h одинаковыми для обеих фаз ($k=1$). При одинаковом сжатии σ с учетом законов сохранения имеем следующие соотношения между параметрами начально твердой и жидкой фаз:

$$(1.2) \quad p_{ж} \simeq \frac{\rho_{0ж}}{\rho_{0т}} \frac{c_{0ж}^2}{c_{0т}^2} p_{т}, \quad D_{ж} \simeq \frac{c_{0ж}}{c_{0т}} D_{т}, \quad U_{ж} \simeq \frac{c_{0ж}}{c_{0т}} U_{т}.$$

На фиг. 1 зависимость 5 соответствует рассмотренной приближенной оценке по соотношениям (1.2). Значения начальных плотностей и начальных скоростей звука для Al ($\rho_{0т} = 2,73$ г/см³, $\rho_{0ж} \simeq 2,1$ г/см³, $c_{0т} = 5,34$ км/с [8], $c_{0ж} = 4,28$ км/с [12]) взяты при температуре 2000°C.

Видно, что полученная таким образом оценка ударной адиабаты начально жидкого Al находится в хорошем соответствии с рассчитанной выше на основе полуэмпирического уравнения состояния жидкой фазы.

Взяв для Sn $\rho_{0т} = 7,28$ г/см³, $\rho_{0ж} = 6,88$ г/см³, $c_{0т} = 2,67$ км/с [8], $c_{0ж} = 2,44$ км/с [13] ($\rho_{0ж}$ и $c_{0ж}$ взяты при $t = 410^\circ\text{C}$, которая соответствовала температуре в экспериментах с жидким оловом), получим при одина-

ковом сжатии σ

$$(1.3) \quad p_{ж} = 0,789p_{т}, \quad D_{ж} = 0,914D_{т}, \quad U_{ж} = 0,914U_{т}.$$

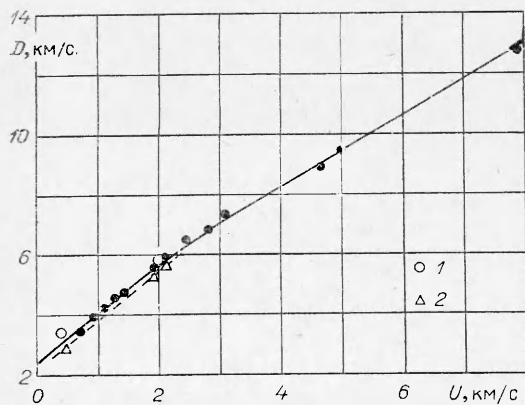
Построенная по этим соотношениям ударная адиабата жидкого олова показана штриховой линией на фиг. 2. Для оценок и сравнений при давлениях около 10 ГПа использована экстраполяция соотношения $D-U$, полученного в диапазоне давлений 17—42 ГПа, $D = 2,38 + 1,712U$ [8], а при более высоких давлениях — ударная адиабата из [5] (сплошная линия с экспериментальными точками на фиг. 2).

2. Определение точек ударной адиабаты жидкого олова. Для исследований было выбрано олово, обладающее по сравнению с другими легкоплавкими металлами меньшими физико-химической активностью, окисляемостью при нагреве и токсичностью. На фиг. 3 показана фазовая диаграмма олова [14] (1 — кривая плавления, 2 — расчетная ударная адиабата твердого олова [6]). Условные ударные адиабаты жидкого олова 3 получены параллельным переносом ударной адиабаты твердого олова (ожидаемые изломы при пересечении с кривой плавления не показаны). Ударная адиабата касается кривой плавления при начальной температуре $\sim 400^\circ\text{C}$.

Получены три точки ударной адиабаты жидкого олова с начальной температурой 410°C при давлениях 9; 68,5 и 82,5 ГПа по измерениям скорости ударной волны с использованием метода отражения [15]. Проводились также опыты с твердым оловом в аналогичной редакции для непосредственного сравнения результатов.

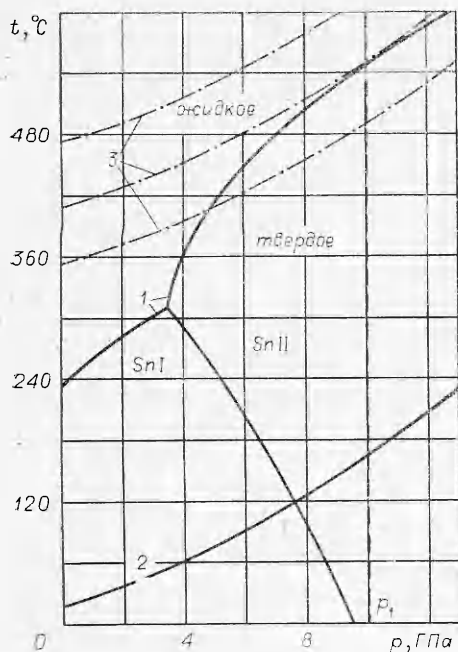
Давление в образце ~ 10 ГПа создавалось при ударе алюминиевого поршня диаметром 65 мм, разгоняемого пороховой пушкой. Ствол располагался вертикально, измерительный узел размещался на дульном срезе, воздух из канала ствола откачивался форвакуумным насосом. Скорость поршня (1 км/с) измерялась в отдельных сериях опытов. Среднеквадратичный разброс серии из 4—6 опытов составлял не более 20 м/с. Давление в образце 68,5 и 82,5 ГПа создавалось ударом алюминиевых пластин, разгоняемых продуктами взрыва ВВ (ТГ 5/5). Ударник толщиной 8 мм имел подлетную скорость 4,66 км/с, толщиной 2 мм — 5,21 км/с. Применялся электроконтактный метод измерений с помощью электроискровой установки и СФР (ЖФР, когда опыты проводились на пороховой пушке).

Постановка опытов по измерению скорости ударной волны в жидком олове показана на фиг. 4. Экран-контейнер 1 для олова 4 выполнен из алюминия, покрытого специально утолщенной окисной пленкой (50—100 мкм) методом анодирования. Окисная пленка предохраняла алюминий от

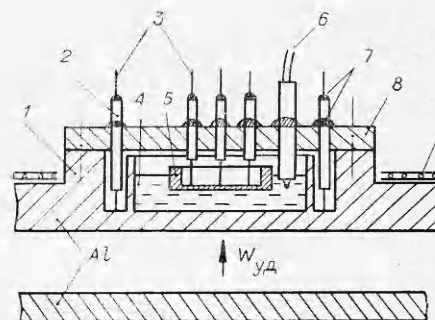


Ф и г. 2

агрессивного воздействия расплава олова и служила электроизоляцией для электроконтактов 3. Электроконтакты верхнего уровня (5...8 шт.) упираются в анодированное дно «поплавка» 5, а нижнего (8 шт.) — в дно кольцевой выемки контейнера. При вычислении скорости ударной волны в расплаве вводилась поправка на толщину дна поплавка (0,25 мм). Нагрев проводился плоской нихромовой спиралью в асбестовой изоляции 9, уложенной на экран-контейнер. Температура расплава измерялась хромель-копелевой термо-



Ф и г. 3



Ф и г. 4

парой 6. Электроконтакты и термопара изолированы от металлической панели 8 стеатитовыми трубками 2, которые крепились термостойкой замазкой 7 на основе жидкого стекла и талька. При сборке измерительного узла проводилась термообработка замазки. Затем измерительный узел охлаждался. При проведении опыта проводился разогрев измерительного узла (опыты с твердым оловом проводились без разогрева).

Результаты экспериментов сведены в табл. 2 и представлены на фиг. 2 (1 — твердое олово, 2 — жидкое). При обработке данных методом отражения [15] при малых давлениях использовалась экспериментальная ударная адиабата алюминия, полученная в диапазоне давлений 4—21 ГПа [16] (экран-контейнер и ударник в этом случае выполнялись из алюминиевого сплава Д16). При высоких давлениях (применялся алюминиевый сплав АМЦ) использовалось $D-U$ -соотношение $D = 5,25 + 1,39U$, как в [3, 10].

Проверено влияние начального нагрева алюминия на его свойства при ударном сжатии измерением скорости ударной волны в алюминиевом экране, нагретом до 410°C, а также ненагретом — для прямого сравнения, при скорости ударника 5,21 км/с. Скорости (8,87 для нагретого экрана и 8,92 км/с — для холодного) совпадают в пределах точности измерений (~1%). Это согласуется с данными [17] для латуни.

При скорости ударника 1 км/с скорость ударной волны в твердом олове, согласно ударной адиабате, экстраполированной по соотношению $D-U$ из области 17—42 ГПа, должна составлять $D'_T = 3,04$ км/с. Можно считать, что в пределах ошибки $D_{ж} = D'_T$. Однако измеренная скорость в твердом олове (3,43 км/с) существенно больше. При высоких давлениях измеренные скорости в твердом и жидком олове практически совпадают при одинаковой скорости ударника, а результаты для жидкого олова хорошо согласуются с оценочной ударной адиабатой по соотношениям (1.3).

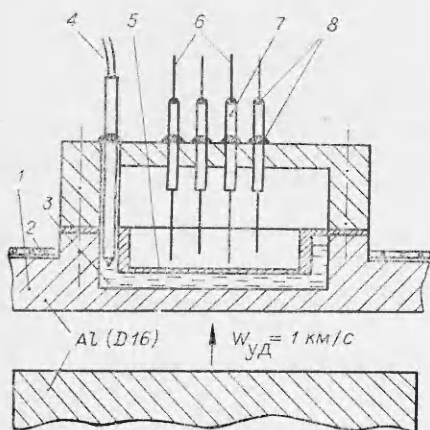
3. Кристаллизация олова в ударной волне. При начальных температурах жидкого олова меньше 400°C его ударная адиабата пересекает кривую плавления (см. фиг. 2) и появляется возможность затвердевания жидкого олова при ударном нагружении. Вопрос об ударном сжатии вещества с фазовым переходом с увеличением плотности рассмотрен в [15]. Если не происходит переохлаждения жидкого олова в ударной волне и оно кристаллизуется, это должно проявиться в изменении массовой скорости. Если понижать начальную температуру жидкого олова, то при

Таблица 2

Скорость ударника $W_{уд}$, км/с	Агрегатное состояние	Начальная температура t , °C	База измерения Δ , мм	Количество опытов	\bar{D} , км/с	$S_{\bar{D}}$, км/с	p , ГПа	U , км/с
1,0	Жидкое	410	4	4	2,89	0,08	9,1	0,46
4,66	Твердое	20	4	3	3,43	0,06	10,0	0,41
5,21	Жидкое	410	10	4	5,40	0,03	68,5	1,86
	Жидкое	410	4	4	5,79	0,06	82,5	2,08
	Твердое	20	4	2	5,80	0,12	85,0	2,02

переходе через граничную температуру 400°C следует ожидать увеличения скорости свободной поверхности (при постоянной скорости ударника).

Схема постановки опытов по измерению скорости свободной поверхности расплава олова показана на фиг. 5. Экран-контейнер 1 из анодированного алюминия нагревается никромовой спиралью в асбестовой изоляции 2. Температура расплава олова 3 измерялась хромель-копелевой термопарой 4. По имеющимся данным, свободная поверхность жидкости при выходе на нее ударной волны летит нерегулярно, с образованием капель. Кроме того, в нашем случае на поверхности жидкого олова образуются окислы, что затрудняет измерения. Был использован титановый индикатор 5 толщиной 0,4 мм, который погружался в расплав. Титан не подвержен агрессивному воздействию жидкого олова, а ударные адиабаты титана и олова очень близки в координатах $p-U$, причем в рабочем диапазоне давлений титан несколько «жестче» олова и поэтому не отрывается от его поверхности после выхода ударной волны в воздух. Расстояние, на котором происходит ускорение титанового слоя до скорости свободной поверхности жидкого олова, по оценкам лежит в пределах 0,5 мм. Над индикатором устанавливалось 16 электроконтактов 6 в шахматном порядке в виде медных жил $\varnothing 0,5$ мм в стеатитовых трубках 7, закрепленных термостойкой замазкой 8. Нижний уровень отстоял на 0,5 мм от индикатора. База измерения 2—2,5 мм, толщина слоя жидкого олова под индикатором 4 мм. Результаты измерений сведены в табл. 3 и представлены на фиг. 6. Видно, что погрешности измерений и разброс самих значений скорости больше при $t < 400^\circ\text{C}$, что можно объяснить тем, что начавшаяся кристаллизация и обратный переход в жидкое состояние после разгрузки влекут за собой появление неплоскостности титанового индикатора на поверхности олова. По результатам измерений похоже, что при температуре 400°C проявился скачок в зависимости $W_{ж}(t)$. К сожалению с имеющимся количеством экспериментальных данных нельзя с достаточной уверенностью сказать, какой зависимостью описываются экспериментальные точки — двухступенчатой (как показано на фиг. 6)



Фиг. 5

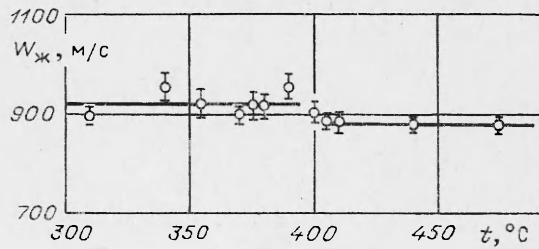
Таблица 3

$t_{нат}$, °C	W_1 , м/с	S_1 , м/с	$S_1^2 \cdot 100, \%$ W_1^2	$t_{нат}$, °C	W_2 , м/с	S_2 , м/с	$S_2^2 \cdot 100, \%$ W_2^2
475	877	14	1,6	380	916	29	3,2
440	878	16	1,8	375	914	30	3,3
410	884	24	2,7	370	899	23	2,6
405	883	16	1,8	355	921	33	3,6
400	904	18	2,0	340	955	30	3,2
390	955	26	2,7	310	897	20	2,2

или одной наклонной прямой, так как различие дисперсий этих зависимостей незначимо [18].

4. Анализ результатов.

С ростом давления в ударной волне разности удельных объемов [19] и скоростей звука [2] между твердой и жидкой фазами уменьшаются до величины погрешностей



Фиг. 6

эксперимента, т. е. жидкая фаза приближается по своим свойствам к твердой фазе, по крайней мере, вблизи кривой плавления. Предложенный в [20] метод определения точки плавления при ударном сжатии пористых веществ, основанный на расчетных оценках (по имеющимся полуэмпирическим уравнениям состояния) изменения скорости ударной волны при плавлении, экспериментально не был подтвержден.

Полученные нами результаты по измерению скорости ударной волны в начально твердом и жидком олове показали, что при одинаковом состоянии в экране (экран из Al) различие скоростей лежит в пределах точности измерений (1—2%). Различие скоростей ударной волны, полученное при малом давлении (~ 10 ГПа), может быть связано с упругим предвестником в твердом олове либо с расщеплением ударной волны из-за фазового перехода олова (SnI) в более плотную модификацию (SnII, см. фиг. 2). С ростом давлений следует, по-видимому, ожидать проявления еще в большей мере тенденции к сближению значений скорости ударной волны для начально твердой и жидкой фаз при одинаковом состоянии в экране, даже при значительном перегреве выше температуры плавления. За это говорят в какой-то степени экспериментальные данные для пористых металлов [1, 21]. Изменение пористости в широком диапазоне (от 1 до 4) слабо (в пределах единиц процентов) сказывается на величине скорости ударной волны, особенно с ростом давлений. Если скорости ударной волны в расплаве и начально твердой фазе равны (состояние в экране одинаково), то сдвиг ударной адиабаты начально жидкой фазы относительно ударной адиабаты твердой фазы при построении экспериментальных точек методом $p-U$ -диаграмм обусловлен исключительно уменьшением начальной плотности. Расчеты и оценки, проведенные для Al, Cu и Sn в п. 1, показывают, что для начально жидкой фазы наклон зависимости $D-U$ не меньше, чем для начально твердой фазы. Полученные экспериментальные данные для жидкого олова также говорят за это. Плавное уменьшение наклона зависимостей $D-U$ с ростом давлений в ударной волне связано, скорее всего, с увеличением вклада электронной составляющей в уравнение состояния.

В [22] предлагается обобщенная ударная адиабата веществ в виде

$$p_i \left(\frac{V}{V_0} \right) = \frac{\rho_{0i} k_j^2}{\rho_{0j} k_i^2} p_j \left(\frac{V}{V_0} \right), \quad D_i \left(\frac{V}{V_0} \right) = \frac{k_j}{k_i} D_j \left(\frac{V}{V_0} \right), \quad U_i \left(\frac{V}{V_0} \right) = \frac{k_j}{k_i} U_j \left(\frac{V}{V_0} \right),$$

где k_i и k_j — некоторые постоянные, относящиеся к различным веществам. Это — практически приближение (1.2) данной работы, только постоянные k_i и k_j в (1.2) в отличие от [22] определены и имеют смысл величины, обратной скорости звука, определяемой сжимаемостью вещества. Хотя результаты [22] имеют обобщающий статистический характер, они еще раз подтверждают, что в первом приближении ударная сжимаемость веществ определяется их акустической жесткостью.

По результатам измерений скорости свободной поверхности расплава олова при различных начальных температурах можно предположить, что

имел место фазовый переход жидкого олова в твердую фазу и обратно при нагружении его до 10 ГПа при начальных температурах $<400^{\circ}\text{C}$.

Поступила 4 VI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Кормер С. Б., Фунтиков А. И. и др. Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах.— ЖЭТФ, 1962, т. 42, вып. 3.
2. Урлин В. Д., Иванов А. А. О плавлении при сжатии ударной волной.— ДАН СССР, 1963, т. 149, № 6.
3. Урлин В. Д. Плавление при сверхвысоких давлениях, полученных в ударной волне.— ЖЭТФ, 1965, т. 49, вып. 2(8).
4. Альтшулер Л. В., Бушман А. В. и др. Изэнтропы разгрузки и уравнение состояния металлов при высоких плотностях энергии.— ЖЭТФ, 1980, т. 78, вып. 2.
5. 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.
6. Mc Queen R. G., Marsh S. P. Equation of state for nineteen metallic elements from shock-wave measurement to two megabars.— J. Appl. Phys., 1960, vol. 31, N 7.
7. Кормер С. Б., Сеницын М. В. и др. Исследование сжимаемости пяти ионных соединений до давлений 5 Мбар.— ЖЭТФ, 1964, т. 47, вып. 4(10).
8. Van Thiel M., Kusubov A. S., Mitchell A. C., Davis V. W. Compendium of shock wave data. Lawrence Radiation Laboratory, University of California, Livermore, UCRL-50108, 1966.
9. Walsh J. M. and Rice M. H. Dynamic compression of liquids from measurements on strong shock waves.— J. Chem. Phys., 1957, vol. 26, N 4.
10. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б. и др. Уравнение состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений.— ЖЭТФ, 1960, т. 38, вып. 3.
11. Дудолодов И. П., Ракитин В. И. и др. Ударная сжимаемость полистирола с различной начальной плотностью.— ПМТФ, 1969, № 4.
12. Круглов Л. Д. Скорость звука, сжимаемость и параметр Грюнайзена расплавов Al, Mg, Zn, Sn, Sb и Cd.— ЖФХ, 1976, т. L, № 10.
13. Гитис Б. М., Михайлов И. Г. Скорость звука и сжимаемость некоторых жидких металлов.— Акуст. журн., 1965, т. XI, вып. 4.
14. Babb S. E., Jr. Parameters in the Simon equation relating pressure and melting temperature.— Rev. Modern Phys., 1963, vol. 35, N 2.
15. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
16. Katz S., Doran D. G., Curran D. R. Hugoniot equation of state of aluminum and steel from oblique shock measurement.— J. Appl. Phys., 1959, vol. 30, N 4.
17. Mitchell A. C. and van Thiel M. Effect of temperature on shock-wave propagation in Cu—Zn alloys.— J. Appl. Phys., 1974, vol 45, N 9.
18. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Наука, 1968.
19. Кормер С. Б., Сеницын М. В. и др. Экспериментальное определение температур ударно-сжатых NaCl и KCl и их кривых плавления до давлений 700 кбар.— ЖЭТФ, 1965, т. 48, вып. 4.
20. Фунтиков А. И. Метод изучения фазовых превращений при высоких давлениях с помощью ударного сжатия пористых веществ.— ФГВ, 1969, т. 5, № 4.
21. Крунников К. К., Бражник М. И., Крунникова В. П. Ударное сжатие пористого вольфрама.— ЖЭТФ, 1962, т. 42, вып. 3.
22. Анисичкин В. Ф. Обобщенные ударные адиабаты элементов.— ПМТФ, 1978, № 3.

УДК 532.593

СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЯ АД-1 И ДЮРАЛЮМИНИЯ Д-16 В УСЛОВИЯХ УДАРНОГО СЖАТИЯ

А. Н. Дремин, Г. И. Канель, О. Б. Черникова
(Черноголовка)

Известно, что прочностные свойства материала довольно существенно влияют на характер эволюции и скорость затухания в нем ударных волн амплитудой в десятки гигапаскалей [1—3]. Регистрация эволюции одномерного импульса