

МЕТОД ИЗУЧЕНИЯ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ УДАРНОГО СЖАТИЯ ПОРИСТЫХ ВЕЩЕСТВ

А. И. Фунтиков
(Москва)

Применение ударного сжатия для изучения фазовых превращений при высоких давлениях представляется весьма интересным.

Рядом авторов рассмотрено поведение ударных адиабат при изменении фазового состояния вещества и, в частности, плавления. В работах [1, 2] установлено, что ударные адиабаты претерпевают изломы на границах области сосуществования твердых и жидких фаз. Однако существующие экспериментальные данные по ударному сжатию выявляют изломы ударных адиабат с большей неопределенностью [3, 4]. Причина заключается в относительно высокой погрешности измерения параметров, определяющих состояние за фронтом ударной волны. Ошибка измерения вносится как при измерении скорости ударной волны или массовой скорости в исследуемом веществе, так и при определении исходной интенсивности ударной волны, подводимой к исследуемому образцу.

Первые оценки температуры плавления при ударном сжатии алюминия и NaCl были сделаны Минеевым и Савиновым [5] на основании измерений вязкости за фронтом ударной волны. Наиболее сильное влияние оказывает процесс плавления на температуру за фронтом ударной волны. Это позволило [6] непосредственными измерениями температуры в NaCl и KCl определить участки кривой плавления вблизи пересечения ее с ударной адиабатой. Результаты [6] использованы для обоснования метода изучения фазовых превращений с помощью ударного сжатия пористых веществ, который в настоящей работе применен к исследованию плавления.

Рассмотрим на $T-p$ -диаграм-

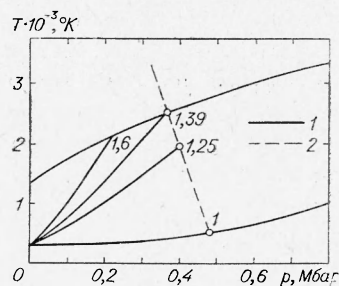


Рис. 1. $T-p$ -диаграмма меди (цифры обозначают пористость). 1 — ударные адиабаты и кривая плавления; 2 — кривая одного заряда.

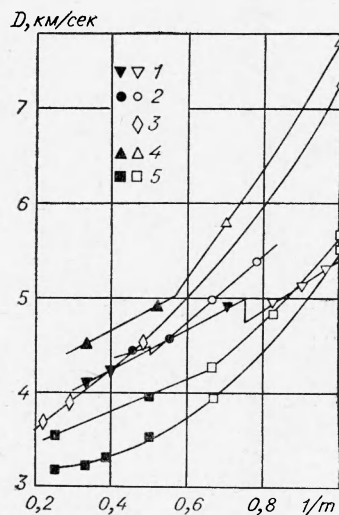


Рис. 2. Зависимость скорости ударной волны, измеренной в условиях одного заряда, от приведенной начальной плотности (черные точки — жидкое состояние вещества, светлые — твердое).
1 — KCl; 2 — NaCl; 3 — LiF; 4 — Al; 5 — Cu.

ме положение ударных адиабат вещества с нормальной начальной плотностью и плотностью, уменьшенной по сравнению с нормальной. Пористостью вещества m будем считать отношение нормальной плотности вещества к начальной. На рис. 1 представлены рассчитанные по уравнениям состояния [4] ударные адиабаты меди, ограниченные кривой плавления. Участок кривой одного заряда, расположенный в области твердого состояния вещества, ограничен ударной адиабатой, отвечающей предельной пористости $m_{пр}$. Зависимость скорости ударной волны от начальной плотности для кривой одного заряда является однопараметрической зависимостью и может быть измерена с относительно высокой точностью в несложных экспериментах. Разница в уравнениях состояния жидкой и твердой фаз приводит к разрыву кривой одного заряда. Расчеты по уравнениям состояния ионных соединений [3, 6] и металлов [4, 7] показали, что скорость ударной волны на участке кривой одного заряда в жидкой фазе больше, чем в твердой, примерно на 2—6% для ионных соединений и на 1—2% — для металлов. Тщательные сравнительные изменения скорости ударной волны в образцах различной плотности позволяют выявить эти изломы.

В работе использовался заряд ВВ из сплава тротил — гексоген 5/5 диаметром 120 и длиной 220 мм, в котором плоская ударная волна формируется специальной линзой. Исходное состояние за фронтом ударной волны в алюминиевом экране, отвечающее давлению $p=330$ кбар и относительному сжатию $\sigma=1,28$, вместе с последующими состояниями при повторном ударном сжатии или изэнтропическом расширении находятся в области твердой фазы вещества и связаны непрерывными зависимостями кинематических и термодинамических параметров.

На рис. 2 представлены экспериментальные данные некоторых ионных соединений и металлов.

Контрольные данные для LiF, относящиеся целиком к твердой фазе вещества, представляют непрерывную зависимость. Для остальных ионных соединений существуют разрывы. Данные для алюминия и меди, ввиду небольшого числа экспериментальных точек, следует рассматривать как предварительные. Полученные зависимости служат для определения $m_{пр}$. Расчет температур плавления предельной пористости производится по уравнению состояния твердой фазы. В указанной ограниченной области давлений и температур вклад теплового возбуждения электронов незначителен, и применимо уравнение состояния Ми — Грюнайзена. Для исследованных ионных соединений были выбраны уравнения состояния, полученные в работах [3, 6], которые удовлетворительно описывают имеющиеся экспериментальные данные: начальный участок адиабаты ударного сжатия, статическую изотерму сжатия при $T=293^\circ\text{K}$, данные по расширению при нормальных условиях, а также для NaCl и KCl согласуются с экспериментальными данными по измерению температур на фронте ударной волны.

Следует отметить, что для достаточно больших $m_{пр}$ ошибка найденного значения температуры плавления слабо зависит от ошибки величины $m_{пр}$, однако при этом заметно увеличивается неточность в расчете давления, который проводится по обычной схеме с привлечением $p-u$ -диаграммы.

Таким образом, температура плавления определяется следующим выражением:

$$T_m = \frac{p - p_x}{\rho_0 \gamma C_v \sigma},$$

в котором C_v — теплоемкость, а p_x и γ — упругое давление и коэффициент Грюнайзена решетки. Полученные данные по плавлению представлены в таблице.

Как видно из рис. 3, данные для KCl совпадают с результатами работы [6]. Для NaCl (рис. 4) температура плавления ближе к кривой

Вещество	$m_{пр}$	p , мбар	$T \cdot 10^3$, °К
KCl	1,32	0,170	3,62
NaCl	1,85	0,132	3,70

плавления второй фазы, имеющей структуру ОЦК, что, возможно, связано с особенностями NaCl, рассмотренными в [3].

Изучение ударного сжатия пористых веществ служит источником информации о кривой плавления при высоких давлениях, значительно

превышающих статические давления, при которых возможны еще надежные измерения параметров сжатия вещества.

Для исследованных изложенным методом оптически прозрачных ионных соединений могут быть получены результаты в промежуточной области между статическими данными и температурой плавления на

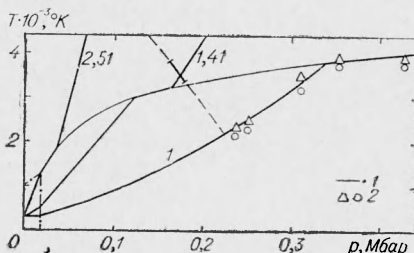


Рис. 3. $T-p$ -диаграмма KCl. Обозначения те же, что на рис. 1.

1 — фазовая кривая для KCl (I); 2 — результаты измерения температуры в [6].

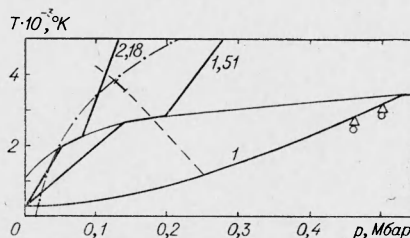


Рис. 4. $T-p$ -диаграмма NaCl. Обозначения те же, что на рис. 1 и 3.

— — — — — фазовая кривая для NaCl (II) по [3].

ударной адиабате монокристалла. В непрозрачных веществах метод открывает новые возможности. Особый интерес представляет изучение плавления горных пород, железа и его сплавов в связи с проблемами строения Земли.

Наряду с плавлением изложенный метод не несет в себе ограничений при исследовании других фазовых превращений при высоких давлениях.

Поступила в редакцию
18/V 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Д. Урлин, А. А. Иванов. Докл. АН СССР, 1963, 149, 1303.
2. Н. М. Кузнецов. Докл. АН СССР, 1964, 155, 156.
3. С. Б. Кормер, М. В. Синицын и др. ЖЭТФ, 1964, 47, 1202.
4. В. Д. Урлин. ЖЭТФ, 1965, 49, 485.
5. В. Н. Минеев, Е. В. Савинов. ЖЭТФ, 1967, 52, 629.
6. С. Б. Кормер, М. В. Синицын и др. ЖЭТФ, 1965, 48, 1033.
7. С. Б. Кормер, А. И. Футников и др. ЖЭТФ, 1962, 42, 686.