

**СТРУКТУРА УДАРНЫХ ВОЛН В КСІ и КВг
ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ СЖАТИИ ДО 200 ТЫС. АТМ**

А. Н. Дремин, С. В. Першин, В. Ф. Погорелов

(Москва)

Способность вещества испытывать полиморфные превращения является общим свойством кристаллических структур. Примерно треть из нескольких сотен веществ, исследованных Бриджменом [1], до давления $100 \cdot 10^9$ бар претерпевает одно или несколько фазовых превращений. Среди фазовых превращений есть очень важные для практического использования: переход графита в алмаз, нитрида бора в боразон и др.

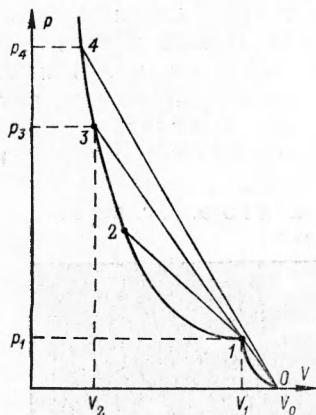


Рис. 1. Ударная адиабата вещества, претерпевающего фазовый переход.

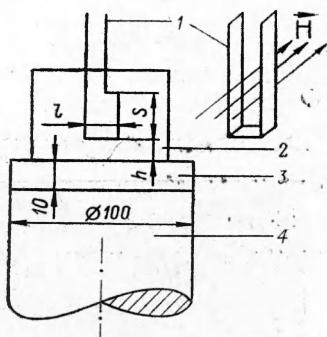


Рис. 2. Схема опыта.
 1 — П-образный датчик; 2 — исследуемое вещество; 3 — экран; 4 — заряд BB.

Данные по динамической сжимаемости веществ, испытывающих полиморфные превращения в статических условиях, интересны для сравнения со статическими данными. Можно надеяться, что такое сравнение поможет разобраться в кинетике фазового превращения при ударном сжатии.

Исследовались галогениды калия: КСІ и КВг. Сжимаемость этих ионных соединений изучалась в статических [1] и динамических условиях [2]. В обоих случаях у этих веществ наблюдалось наличие фазовых переходов. В динамических условиях фазовому переходу отвечает излом ударной адиабаты в ($p - V$)-координатах (рис. 1). При этом в области давлений от p_1 до p_3 по веществу распространяются две ударные волны со скоростями, соответствующими наклонам прямых $O-1$ и

1—2 (рис. 1) [3]. Выше p_3 по веществу распространяется одна ударная волна, причем фазовое превращение совершается в стационарной области на ее фронте.

Метод снятия ударных адиабат, примененный в работе [2], не позволяет измерить скорость второй ударной волны в «закрытой» области от p_1 до p_3 и построить на этом участке ударную адиабату. В настоящей работе для исследования «закрытой» области был применен электромагнитный метод измерения массовой скорости вещества за фронтом ударной волны, разработанный Е. К. Завойским [4] в 1948 г. При этом методе исследуемое вещество с вмонтированным в него П-образным датчиком и заряд ВВ помещаются в электромагнитное поле. При прохождении ударной волны по исследуемому веществу перекладина тонкого алюминиевого (0,03 мм) датчика движется вместе с веществом с его массовой скоростью u , нормально пересекая магнитные силовые линии поля. Зависящая от этой скорости наведенная в датчике э. д. с. регистрируется осциллографом.

ПОСТАНОВКА ОПЫТОВ

В опытах использовались спрессованные образцы KCl с плотностью $\rho = 1,90 \text{ г}/\text{см}^3$ и KBr с плотностью $\rho = 2,70 \text{ г}/\text{см}^3$. Соответствующие плотности монокристаллов — 1,999 и 2,766 $\text{г}/\text{см}^3$.

Монтаж опытов, проведенных в электромагнитном поле, показан на рис. 2. Ударная волна, создаваемая зарядом ВВ, воспринимается исследуемым веществом через парафиновый экран. Датчик в разных опытах устанавливался на различных расстояниях h от экрана. В некоторых опытах в вещество помещался двухступенчатый датчик (см. рис. 2) с расстоянием между ступенями S , что позволяет измерить среднюю скорость ударной волны. Действительно, по достижении ударной волной второй ступеньки датчика в этой ступени будет наведена э. д. с., направление которой противоположно направлению э. д. с. первой ступень-

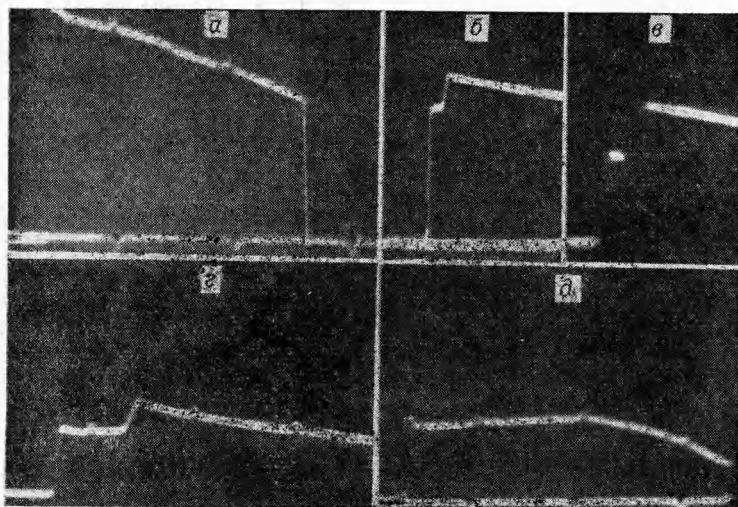


Рис. 3. Осциллограммы опытов по измерению массовых скоростей в KCl электромагнитным методом на различных глубинах образца h :
а — 0 мм; б — 1,63 мм; в — 7,06 мм; г — 11,73 мм; д — 16,5 мм; при начальном давлении в парафиновом экране $37,5 \cdot 10^6 \text{ бар}$.

ки. Это приводит к тому, что луч резко отклонится вниз на осциллограмме массовой скорости. Отсюда $D = \frac{s}{t}$, где t — время от начала осциллограммы до момента прихода переднего фронта волны на вторую ступеньку (рис. 3, а).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Типичные осциллограммы, полученные в опытах на электромагните, представлены на рис. 3 и 4. Фронт первой ударной волны крутой, его завал соизмерим с завалом осциллограммы при регистрации прямоугольного импульса напряжения. Фронт второй ударной волны менее крутой и немного расширяется с ростом глубины установки датчика h , при этом массовая скорость вещества за фронтом второй ударной волны падает, а расхождение между двумя ударными волнами Δt растет.

Основное количество опытов было проведено при давлении в парафиновом экране $37,5 \cdot 10^9$ бар в случае KCl (рис. 5) и $45,0 \cdot 10^9$ бар в случае KBr (рис. 6).

Построение точек на каждой паре графиков проводилось следующим образом. В $(u-h)$ -координатах наносились точки, соответствующие первой массовой скорости u_1 , на различных глубинах образца h . Как видно из графика, для KCl u_1 быстро спадает на глубине $h \approx 4,5-5$ мм до постоянного на всех других глубинах (вплоть до $h=20$ мм) значения $u_1 = -0,31 \pm 0,01$ км/сек. Скорость первой ударной волны определялась как при расположении первой ступеньки датчика на границе с парафиновым экраном, так и на глубине более 5 мм от этой границы. Первое необходимо для построения в $(t-h)$ -координатах точки t , через которую пройдет кривая для первой ударной волны, второе — для того, чтобы измерить эту скорость на участке ее постоянства и провести через указанную точку t луч с наклоном, соответствующим этой постоянной скорости. В случае KCl скорость $D_1 = 3,20 \pm 0,02$ км/сек. Теперь точки, построенные в $(u-h)$ -координатах для u_1 , сносятся вертикально на построенный в $(t-h)$ -координатах луч для D_1 , и из этих вновь получаемых точек проводятся лучи с постоянным наклоном, соответствующим постоянной скорости u_1 . На эти лучи проектируются соответствующие полученные в опытах временные расхождения Δt двух ударных волн. Кривая, проведенная через полученные таким образом точки, есть кривая распространения второй ударной волны в лабораторных $(t-h)$ -координатах. Зеркальное диф-

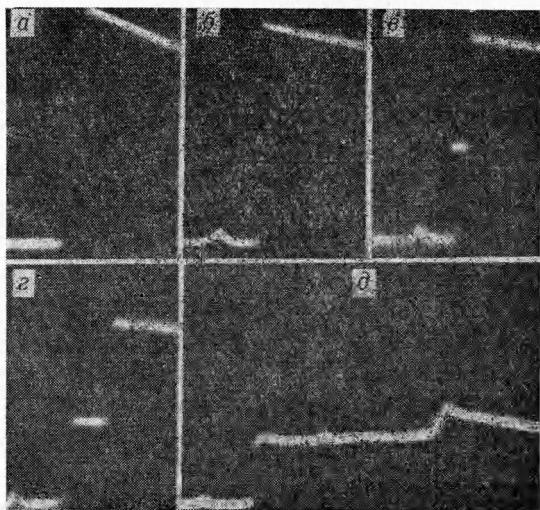


Рис. 4. Осциллограммы опытов по измерению массовых скоростей в KBr электромагнитным методом на различных глубинах образца h :
— 0 мм; б — 4,85 мм; в — 9,74 мм; г — 19,83 мм; д — 30,15 мм; при начальном давлении в парафиновом экране $45 \cdot 10^9$ бар.

ференцирование этой кривой дает значение скорости второй ударной волны на различных глубинах образца. На вертикалях, опущенных из экспериментальных точек кривой D_2 в $(u-h)$ -координатах, откладываются значения массовых скоростей за фронтом второй ударной вол-

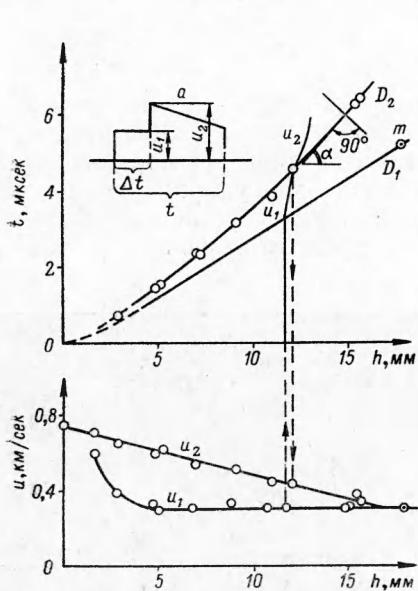


Рис. 5. Совместные $(t-h)$ - и $(u-h)$ -диаграммы, построенные по экспериментальным данным для KCl (лабораторная система координат).
а — схематическое изображение двуволновой конфигурации.

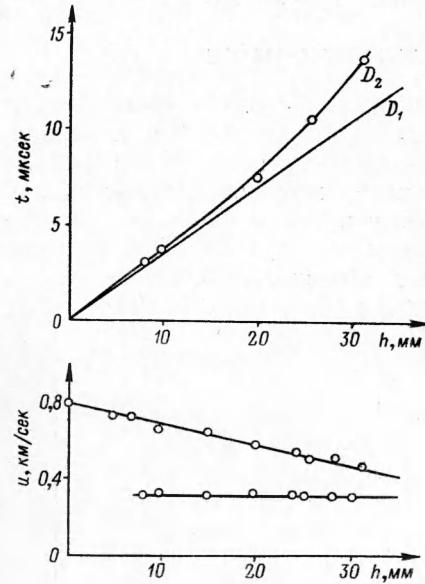


Рис. 6. Совместные $(t-h)$ - и $(u-h)$ -диаграммы, построенные по экспериментальным данным для KBr.

ны. Из $(u-h)$ -координат видно, что вторая массовая скорость спадает на глубине $h \approx 17$ мм до значения первой массовой скорости, которая после этого еще некоторое время сохраняет свое постоянное значение.

Расчетные данные по динамической сжимаемости KCl и KBr в интервале существования истинных двуволновых конфигураций

D_2 , км/сек	U_2 , км/сек	$P_2 \cdot 10^{-9}$, бар	V_2 , $\frac{\text{см}^3}{2}$
KCl			
1,975	0,350	20,27	0,464
2,048	0,405	22,36	0,450
2,230	0,470	25,35	0,436
2,400	0,530	28,77	0,426
2,575	0,600	32,75	0,414
2,760	0,665	37,20	0,407
KBr			
1,430	0,435	27,88	0,292
1,660	0,480	30,58	0,288
1,850	0,520	33,80	0,284
2,225	0,582	39,40	0,282
2,420	0,632	44,10	0,279
2,680	0,689	50,80	0,276

Скорость первой ударной волны и массовая скорость вещества за ней остаются постоянными при трех различных начальных давлениях в парафиновом экране, а именно $22,0; 37,5$ и $45,0 \cdot 10^9$ бар.

Аналогичные данные получены и для КВг: $D_1 = 2,79 \pm 0,02$ км/сек., $u_1 = 0,31 \pm 0,01$ км/сек. Спад первой массовой скорости по глубине образца для КВг не наблюдался. По полученным данным рассчитывались ударные адиабаты KCl и КВг в $(p - V)$ -координатах в областях, закрытых первой ударной волной. За начальные состояния при расчете принимались значения p_1 и V_1 в точках излома ударных адиабат, определенные как параметры за фронтом первой ударной волны:

для KCl $p_1 = 18,9 \cdot 10^9$ бар, $V_1 = 0,4750$ г/см³;

для КВг $p_1 = 23,8 \cdot 10^9$ бар, $V_1 = 3285$ г/см³.

Расчет производился по формулам:

$$p_2 = p_1 + \rho_1 (D_2 - u_1) (u_2 - u_1),$$

$$V_2 = V_1 \frac{D_2 - u_2}{D_2 - u_1},$$

где значения всех скоростей берутся в лабораторной системе координат (см. таблицу).

Построенные по этим данным в $(p - V)$ -координатах адиабаты KCl и КВг приведены на рис. 7. Точки выше области I-II построены по методу отражения [5-6]. Скорости ударных волн определялись электромагнитным методом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно [3], распространение ударных волн в газе с замедленным возбуждением некоторых степеней свободы состояние газа, скатого ударной волной, сначала описывается точкой 1'' (рис. 8), лежащей на ударной адиабате газа с некоторыми невозбужденными степенями свободы, а затем в течение некоторого времени по мере возбуждения остальных степеней свободы, газ приходит в состояние 2'' на адиабате с полностью возбужденными степенями свободы. При этом все промежуточные состояния газа лежат на линии 1''—2'', являющейся продолжением 0—1''.

Рассмотрим результаты опытов с точки зрения этих представлений. На рис. 8 представлена кривая сжимаемости вещества, испытывающего полиморфное превращение с уменьшением объема.

При давлении ниже p_1 превращение не происходит независимо от времени действия этого давления.

Рассмотрим случай стационарной волны. Пусть скорость волны задана точкой 2''. В этом случае двуволновой конфигурации не существует. По Я. Б. Зельдовичу это будет сильная волна с размазанным за счет превращения 1'' до 2'' фронтом (рис. 8, a), причем чем сильнее

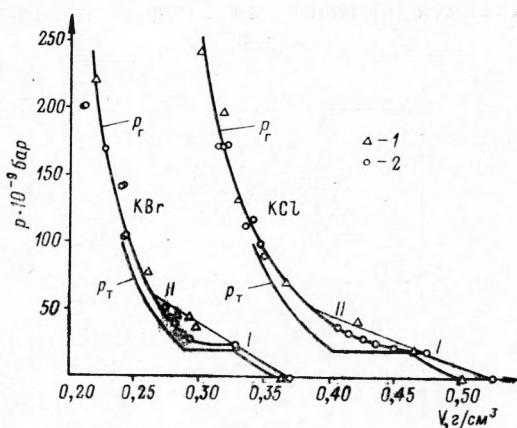


Рис. 7. Экспериментальные ударные адиабаты KCl и КВг (P_r) и кривые сжимаемости по данным [1] (P_T).
1 — данные Альтшулеря и сотр. [2], 2 — данные авторов.

волна, тем уже ширина фронта Δt . Профиль давления в переходной области ($1''-2''$) зависит от кинетики превращения. В частности, он может быть такой, как изображен на рис. 8, б. Ширина полочки на фронте является периодом индукции τ . Очевидно, что в очень сильных волнах превращение начинается во фронте сразу ($\tau=0$) и заканчивается по истечении времени Δt . Если волна прямоугольная, то ширина фронта и профиль давления во фронте по мере ее распространения остаются постоянными. Если же волна не прямоугольная, она затухает,

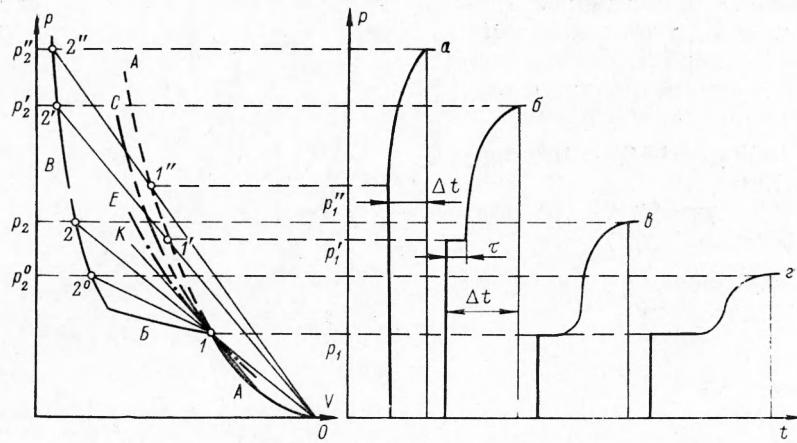


Рис. 8. Ударная адиабата вещества, испытывающего фазовое превращение, и профили ударных волн при различных давлениях.

А — ударная адиабата первой фазы; Б — область смешанных фаз; В — кривая ударной сжимаемости вещества после фазового превращения (второй фазы); С — адиабата двукратного сжатия первой фазы; Е — изэнтропа, касающаяся адиабаты С в точке 1; К — касательная к изэнтропе в точке 1; *a* — сильная ударная волна со сложным профилем; *б* — ложная двуволновая конфигурация; *в* и *г* — истинные двуволновые конфигурации.

ширина фронта увеличивается, увеличивается τ , а p_1 на фронте падает. Формально волну с таким профилем можно спутать с двуволновой конфигурацией. На самом же деле это ложная двуволновая конфигурация, и ее отличие от истинной состоит в том, что давление на переднем фронте p_1 по мере распространения волны падает.

Когда давление в волне упадет ниже p_2 , образуются истинные двуволновые конфигурации. Фронт первой волны крутой и по мере распространения не затухает, пока существует вторая волна. Вторая волна, по Зельдовичу, является слабой (рис. 8, в, г). Действительно, точка 1 является состоянием, по которому движется вторая волна. Состояние вещества непосредственно на ее фронте следует определять по ударной адиабате исходного вещества, для которой состояние 1 является начальным. Из теории ударных волн известно, что ударная адиабата из состояния 1, адиабата двукратного сжатия С и касающаяся ее в этой точке изэнтропа проходят между ударной адиабатой и прямой Михельсона, проходящей через точку 0. Касательная к изэнтропе в точке 1 определяет скорость малых возмущений в веществе, еще не подвергшемся превращению. Очевидно, эта скорость больше скорости волны, которая определяется наклоном, например, прямой $1-2''$. Это приводит к размыванию фронта второй волны. Поскольку убегающие вперед возмущения слабые, в эксперименте размывание фронта второй волны незначительное. Поэтому приближенно эту волну можно считать стационарной и рассчитать ее параметры по законам сохранения. Как

видно из рис. 7, параметры в точках излома ударных адиабат KCl и KBr близки к соответствующим параметрам, полученным Бриджменом [1].

Близость параметров в точках излома кривых сжимаемости в статике и динамике говорит о том, что для фазового превращения в данном случае почти безразлично какое время, большое (в статике) или очень малое (в динамике), действует давление, необходимое для превращения. Крутизна фронта второй ударной волны свидетельствует о том, что фазовое превращение происходит очень быстро. В пользу этого утверждения говорит также тот факт, что датчик, установленный на границе раздела экрана с исследуемым образцом, дает на осциллограмме такую же запись, как в инертном веществе. Если бы время полиморфного превращения было больше времени завала осциллограммы, то в таком опыте был бы обнаружен рост массовой скорости, соответствующий уменьшению объема при фазовом переходе.

По проведенным оценкам время, необходимое для фазового превращения в KCl и KBr при давлениях порядка $40 \cdot 10^9$ бар, не превышает 0,2 мсек.

Поступила в редакцию
24/II 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. P. W. Bridgman. Proc. Amer. Acad., 1945, **76**, 1.
2. Л. В. Альтшулер, М. Н. Павловский и др. ФТТ, 1963, 5, 1.
3. Я. Б. Зельдович и Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., 1963.
4. В. М. Зайцев, П. Ф. Похил, К. К. Шведов. Докл. АН СССР, 1960, **132**, 1339.
5. Л. В. Альтшулер, К. И. Крупников, М. И. Бражник. ЖЭТФ, 1958, 34, 886.
6. А. Н. Дремин, Г. А. Агадуров. Докл. АН СССР, 1959, **128**, 261.