

9. Лаврентьев М. А., Ишлинский А. Ю. Динамические формы потери устойчивости упругих систем. — «Докл. АН СССР», 1949, т. 65, № 6.
10. Walsh J., Shreffler R., Willig F. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions. — «J. Appl. Phys.», 1953, vol. 24, N 3. Рус. пер. Предельные условия для образования струн при соударениях на высоких скоростях. — Сб. Механика. Вып. 2(24), 1954.
11. Chou P., Carleone J., Karpp R. Criteria for jet formation from impinging shells and plates. — «J. Appl. Phys.», 1976, vol. 47, N 7.
12. Koski W., Lucy F., Shreffler R., Willig F. Fast jets from collapsing cylinders. — «J. Appl. Phys.», 1952, vol. 23, N 12.
13. Новиков Н. П. О высокоскоростных кумулятивных струях. — ПМТФ, 1962, № 6.
14. Новиков Н. П. О некоторых свойствах высокоскоростных кумулятивных струй. — ПМТФ, 1963, № 1.

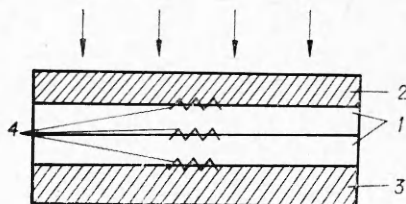
УДК 532.593

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УДАРНЫХ ВОЛН В НИТРИДЕ БОРА И ГРАФИТЕ В ОБЛАСТИ ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

А. В. Ананьин, А. Н. Дремин, Г. И. Канель, С. В. Першин

(Черноголовка)

Исследования ударной сжимаемости и продуктов ударного сжатия графитоподобного нитрида бора [1—4] и графита [5—8] показали, что эти вещества претерпевают в ударной волне превращения в плотноупакованные модификации с тетраэдрической координацией атомов. Цель данной работы — выявить возможности исследования кинетики этих превращений. Если характерное время релаксационного процесса сравнимо с временем нагружения образца, то кинетику процесса можно определить путем анализа серий профилей давления $p(t)$ или массовой скорости внутри образца при его ударном сжатии [9]. Схема опытов регистрации эволюции импульса давления в нитриде бора и графите в условиях однократного и ступенчатого ударного сжатия приведена на фиг. 1. В направлении, указанном стрелками, в образец 1 через алюминиевый или плексигласовый экран 2 проходила ударная волна с первоначально прямоугольным профилем давления. Ступенчатое сжатие образца осуществлялось проходящей и затем отраженной от медной или алюминиевой преграды 3 ударными волнами. Для регистрации профилей давления использовались манганиновые датчики [10] 4, установленные на границах раздела экран — образец, образец — преграда, а также в среднем сечении образца. Образцы имели диаметр 120 мм и общую толщину 5—15 мм. Плотность образцов нитрида бора варьировалась от 1,57 до 1,80 г/см³, графита — от 1,80 до 1,97 г/см³. Датчики изготавливались травлением из манганиновой фольги толщиной 30 мкм и имели площадь $\sim 7 \times 7$ мм² и сопротивление 2,5—3,5 Ом. От поверхностей образца, экрана и преграды датчики отделялись изолирующими фторопластовыми прокладками. Общая толщина датчика с изоляцией не превышала 0,17 мм. Нагружение образцов



Ф и г. 1

Нагружение образцов осуществлялось с помощью ударной волны, распространяющейся в направлении, указанном стрелками. Ударная волна проходит через экран 2 и воздействует на образец 1. Ступенчатое сжатие образца осуществляется за счет отражения ударной волны от преграды 3. Датчики 4 регистрируют давление в различных частях образца и на границах с экраном и преградой.

осуществлялось ударом алюминиевой пластины толщиной 7—10 мм. Для разгона пластин использовались взрывные метательные устройства [11]. В ряде опытов с образцами нитрида бора увеличенной толщины импульс сжатия с приблизительно прямоугольным профилем формировался в плексигласовом экране при торможении на его поверхности продуктов детонации заряда взрывчатого вещества, расположенного

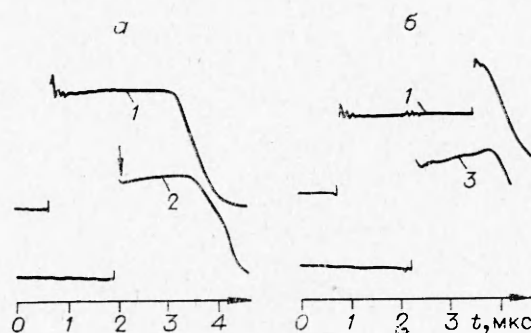
на некотором расстоянии от экрана. Геометрическая схема генератора ударной волны в этом случае подобна описанной в [12], но размеры увеличены. Изменением массы заряда взрывчатого вещества амплитуда входящей в образец ударной волны варьировалась от 55 до 90 кбар, при этом спад давления за фронтом не превышал 15% в течение 6 мкс.

Регистрация показаний трех манганиновых датчиков проводилась по мостовой схеме с использованием двух двухлучевых осциллографов ОК-33. Типичные осциллограммы приведены на фиг. 2—4. На осциллограммах цифрой 1 отмечен профиль давления, регистрируемый датчиком, расположенным между экраном и образцом, 2 — внутри образца, 3 — между образцом и преградой. Стрелками отмечены моменты начала фазового перехода в контролируемом слое образца. Из обработки осциллограмм определялись давления за фронтом ударных волн и их скорость по интервалам времени между моментами прихода к датчикам; по этим данным затем рассчитывались соответствующие значения массовых скоростей и удельных объемов. Давление определялось по относительному изменению сопротивления датчика с использованием эмпирической зависимости [13]

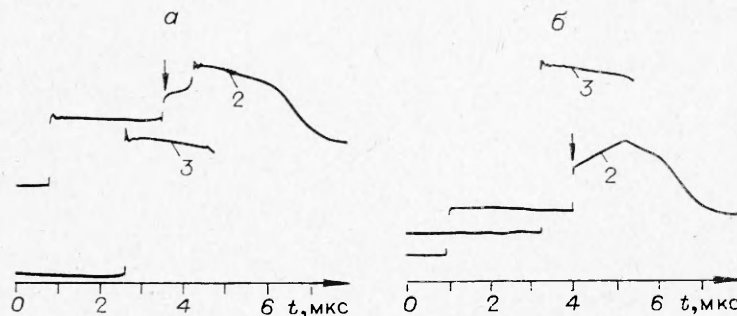
$$p = (340\Delta R/R_0 + 70(\Delta R/R_0)^3) \text{ кбар.}$$

В [13] подтверждена также правомочность использования этой зависимости в случае измерения давления при ступенчатом сжатии.

На фиг. 2, а приведена осциллограмма одного из опытов по регистрации обусловленных фазовым переходом особенностей на профиле давления в проходящей ударной волне. Амплитуда ударной волны в образце нитрида бора в этом опыте составляла 132 кбар. Профиль давления, регистрируемый вторым датчиком, состоит из скачка до 120 кбар и следующей за



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

ним области плавного нарастания (в течение ~ 1 мкс) давления до конечного. Затем до прихода волны разрежения давление некоторое время остается постоянным. Расщепление ударной волны с образованием двухволновой конфигурации [13] в этих опытах не зафиксировано. По-видимому, фазовому превращению соответствует на профиле давления область плавного роста за фронтом ударной волны. Для того чтобы убедиться в этом, был поставлен опыт с регистрацией профиля давления на границе с жесткой (медной) преградой при той же амплитуде падающей на образец нитрида бора ударной волны.

На основе описанных результатов степень превращения в плотную модификацию непосредственно после первого скачка давления равна нулю, но с увеличением расстояния от фронта ударной волны она плавно возрастает. Можно убедиться, что в этом случае из-за различной крутизны ударных адиабат вторичного сжатия исходной и плотной фаз скорость нарастания давления на границе с жесткой преградой после первого скачка должна непропорционально возрасти. Осциллограмма этого опыта приведена на фиг. 2, б. Видно, что особенности профиля давления оказались более четко выраженными. Первый скачок давления на границе с медной преградой составил 190 кбар, затем в течение ~ 1 мкс давление возрастает до 213 кбар.

Таким образом, по крайней мере при давлениях в ударной волне 120—132 кбар превращение нитрида бора в плотную модификацию проходит с вполне измеримой скоростью. Релаксационный характер превращения должен также проявляться на регистрируемом первым датчиком профиле давления в виде характерного пика. Такая особенность профиля давления на границе экран — образец описывает «мгновенное» сжатие исходного материала до метастабильного состояния с давлением выше давления начала перехода и последующий переход к равновесному состоянию, сопровождающийся уменьшением объема и разгрузкой [14, 15].

Как видно из приведенных на фиг. 2 осциллограмм, пики на профилях давления, регистрируемых первыми датчиками, действительно фиксируются, но их длительность близка к пределу разрешимости методики и потому их количественное описание затруднительно. В случае превращения в плотную модификацию прямоугольный импульс сжатия с пиком давления на фронте не может быть стационарным, такой профиль давления характерен только для начала процесса на границе с экраном. При распространении по веществу форма импульса сжатия трансформируется и близким к стационарному становится профиль с резким скачком давления до величины p^* (соответствующей давлению начала превращения) и последующим относительно плавным ростом давления, сопровождаемым дальнейшим уменьшением удельного объема в связи с превращением в плотную модификацию. Окончательная степень превращения определяется конечным давлением и временем действия повышенного (над p^*) давления. По имеющимся результатам (фиг. 2, а) можно сделать крайние оценки степени превращения нитрида бора в плотную модификацию к моменту достижения максимального давления 132 кбар. Для оценок область относительно плавного нарастания давления описывалась либо центрированной волной сжатия, либо стационарной волной, распространяющейся с той же скоростью, что и фронт ударной волны. Для обоих случаев

рассчитывались значения удельных объемов v , соответствующие состоянию вещества при конечном давлении и рассматривалось положение полученных точек на $p-v$ -диаграмме относительно ударных адиабат исходной и плотной фаз нитрида бора. Произведенные таким образом крайние оценки степени превращения в предположении аддитивности сжимаемостей исходной и плотной фаз [16] показывают, что в рассматриваемом случае за время ~ 1 мкс в плотную модификацию переходит от 30 до 60% нитрида бора. В опытах с однократным ударным сжатием расщепление ударной волны с образованием двухволновой конфигурации не зафиксировано. Между тем образование двухволновой конфигурации является наиболее наглядным и убедительным свидетельством фазового перехода в ударной волне. При этом создаются наиболее благоприятные условия для определения параметров перехода.

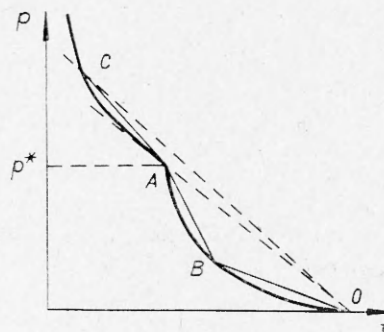
Условия для расщепления ударной волны можно создать при ступенчатом сжатии образца. Ударные адиабаты нитрида бора с плотностью меньше $1,8 \text{ г/см}^3$ и графита качественно имеют вид, представленный на фиг. 5. Область смешанных фаз расположена над лучом постоянной скорости OA . Поэтому все состояния достигаются одним ударно-волновым скачком. Если же предварительно вещество сжать до некоторого состояния B и затем создать в нем ударную волну с амплитудой p_c , то последняя распадется на две: в первой волне давление поднимается до давления начала превращения p^* , во второй — до p_c (малым отличием ударных адиабат двукратного и однократного сжатия здесь пренебрегается).

Осциллограммы опытов по ступенчатому сжатию нитрида бора и графита приведены на фиг. 3, 4 соответственно. Толщины таблеток составного образца выбирались такими, чтобы волна сжатия, возникшая в результате взаимодействия с экраном отраженной от преграды ударной волны, приходила ко второму датчику после регистрации им двухволновой структуры. Путем обсчета осциллограмм определялись давление начала полиморфного превращения, амплитуды входящей и отраженных ударных волн и их скорости по соответствующим временным интервалам между моментами прихода к датчикам; затем по этим данным были рассчитаны соответствующие значения массовых скоростей и удельных объемов. Для опытов с увеличенной длиной волны вводились поправки на малый спад давления перед приходом отраженной ударной волны.

Вид профиля давления при ступенчатом сжатии нитрида бора определяется амплитудой отраженной ударной волны p_2 . При достаточной высокой конечных давлениях p_2 в образце формируется четко выраженная двухволновая структура (см. фиг. 3, а, профиль 2). При уменьшении давления p_2 фронт второй волны двухволновой конфигурации размывается (см. фиг. 3, б, профиль 2). Наблюдаемый на осциллограммах плавный подъем давления за фронтом первой волны двухволновой конфигурации свидетельствует об относительно медленном развитии процесса превращения.

Качественно такой же вид имеет осциллограмма опыта по ступенчатому нагружению графита (см. фиг. 4).

Сравнительно большие времена, за которые осуществляются частичные полиморфные превращения в нитриде бора и графите, при ступенчатом сжатии делают возможным, как и в случае проходящей ударной волны, исследование кинети-



Ф и г. 5

p , кбар	55	74	92	120	198
v , $\frac{\text{см}^3}{\text{г}}$	0,392 $\pm 0,005$	0,384 $\pm 0,005$	0,377 $\pm 0,005$	0,360 $\pm 0,005$	0,300 $\pm 0,01$

тических особенностей этих превращений. Оценка начальной скорости превращения в нитриде бора за фронтом ударной волны дает величину $(0,3-0,5) \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ при нарастании давления от 120 до 134 кбар. Завершение превращения происходит во фронте второй волны двухволновой конфигурации с более высокой скоростью. Судя по завалу фронта на осциллограмме, время завершения превращения не превышает 0,1 мкс при конечном давлении ударного сжатия $p_2 = 160$ кбар.

Следует отметить, что предложенный способ расщепления ударной волны позволяет более точно и с меньшими затратами времени, чем с помощью традиционных методов, определить параметры состояния, при котором совершаются полиморфные превращения у веществ, ударные адиабаты которых имеют вид, подобный изображенному на фиг. 5.

Определенные по многим опытам давления начала полиморфных превращений составляют 120 кбар для нитрида бора (разброс экспериментальных данных $+2$ кбар) и 196 ± 5 кбар для графита. Возможная систематическая погрешность амплитудных измерений определяется погрешностью калибровочной кривой, описывающей связь между относительным изменением электросопротивления манганина и давлением. По данным [13] эта погрешность не превышает $\pm 5\%$.

В таблице приведены данные об ударной сжимаемости нитрида бора, полученные в результате описанной выше обработки осциллограмм. В пределах погрешности измерений эти данные находятся в хорошем согласии с опубликованными [1-4]. Влияние начальной плотности и характера ударного сжатия на положение точек в p , v -координатах не ощущается.

Интересно сопоставить параметры начала полиморфных превращений в нитриде бора и графите, являющихся кристаллохимическими аналогами, с практически одинаковыми плотностями соответствующих модификаций. Сопоставление кривых ударной сжимаемости этих двух веществ показывает, что при существенном различии давлений начало фазового превращения характеризуется практически одним и тем же значением удельного объема $v = 0,36 \pm 0,01 \text{ см}^3/\text{г}$, а его завершение — значением $v = 0,29 \pm 0,01 \text{ см}^3/\text{г}$.

По измерению времени прихода волны разгрузки с тыльной поверхности ударника в заданные сечения образца определялась скорость звука в однократно сжатом материале. При давлении 70 кбар она равняется 5,9 км/с, а при 120 кбар — 7,0 км/с. Ввиду нечеткой выраженности момента начала разгрузки на осциллограммах точность определения скорости звука невысока, но погрешность все же не превышает 10%.

Таким образом, в работе показана возможность изучения кинетики полиморфных превращений в нитриде бора и графите при ударном сжатии. Реализован новый способ выявления области фазовых переходов на ударных адиабатах путем создания условий для расщепления ударной волны.

Поступила 23V 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Ададуров Г. А., Алпеев З. Г., Атовмян Л. О., Бавина Т. В., Бородин Ю. Г., Бреусов О. Н., Дремин А. Н., Мураневич А. Х., Першин С. В. Образование вюртцитоподобной модификации нитрида бора при ударном сжатии. — «Докл. АН СССР», 1967, т. 172, № 5.
2. Альтшулер Л. В., Павловский М. Н., Дракин В. П. Особенности фазовых превращений в ударных волнах сжатия и разгрузки. — ЖЭТФ, 1967, т. 52, № 2.
3. Coleburn N. L., Forbes J. W. Irreversible transformation of hexagonal boron nitride by shock compression. — «J. Chem. Phys.», 1968, vol. 48, N 2.
4. Gust W. H. Hugoniot parameters for hot-pressed boron nitride to 120 GPa. — «Bull. Amer. Phys. Soc.», 1976, vol. 21, N 3.
5. Alder B. J., Christian R. N. Behavior of strongly shocked carbon. — «Phys. Rev. Lett.», 1961, vol. 7, N 10.
6. Павловский М. Н., Дракин В. П. К вопросу о металлической фазе углерода. — «Письма в ЖЭТФ», 1966, т. 4, № 5.
7. Дремин А. Н., Першин С. В. К вопросу о динамической сжимаемости углерода. — ФГВ, 1968, № 1.
8. McQueen R. G., Marsh S. P. Hugoniots of graphites of various initial densities and equation of state of carbon. — In: Comportament des milieux denses sous hautes pressions dynamiques. Paris — New York, 1968.
9. Канель Г. И. Об экспериментальном определении кинетики релаксационных процессов при ударном сжатии конденсированных сред. — ПМТФ, 1977, № 5.
10. Канель Г. И. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, № 477-74 деп., 1974.
11. Канель Г. И., Молодец А. М., Воробьев А. А. О метании пластин взрывом. — ФГВ, 1974, № 6.
12. Колдунов С. А., Шведов К. К., Дремин А. Н. Разложение пористых ВВ под действием ударных волн. — ФГВ, 1973, № 2.
13. Канель Г. И., Вахитова Г. Г., Дремин А. Н. Метрологические характеристики манганиновых датчиков давления в условиях ударного сжатия и разгрузки. — ФГВ, 1978, № 2.
14. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. — УФН, 1965, т. 38, вып. 3.
15. Hayes D. B. Polymorphic phase transformation rates in shock-loaded potassium chloride. — «J. Appl. Phys.», 1974, vol. 45, N 3.
16. Дремин А. П., Карпухин И. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ. — ПМТФ, 1960, № 3.

УДК 532.593 : 536.711

ОБОБЩЕННЫЕ УДАРНЫЕ АДИАБАТЫ ЭЛЕМЕНТОВ

В. Ф. Анисичкин

(Новосибирск)

Ударные адиабаты (УА) необходимы при анализе любых взрывных процессов. Они являются основным источником знаний об уравнениях состояния веществ при высоких давлениях и температурах. Этим объясняется и большой интерес к их экспериментальному определению. К настоящему времени известно около тысячи УА, в том числе разными авторами получено около двухсот УА многих элементов периодической системы Д. И. Менделеева. Такое большое число данных позволяет провести их статистическую обработку и обнаружить определенные закономерности.

Обобщенные формы УА веществ предлагались неоднократно, например, в [1—3]. При этом УА приближенно считались линейными в координатах массовая скорость — скорость ударной волны. Ниже рассматриваются обобщенные УА элементов, свободные от этого предположения.

1. В координатах скорость ударной волны — массовая скорость экспериментальные УА обычно приближают простыми аналитическими зависимостями, чаще отрезками прямых линий

$$(1.1) \quad D = a + \lambda u.$$