

Результаты экспериментов приведены на рис. 6. Из графика видно, что $\bar{\sigma}$ с увеличением начального угла метания α среднее напряжение среза $\bar{\sigma}$ растет и при $\alpha=10^\circ$ достигает практически максимально возможного значения (при наличии прокладки). Рост $\bar{\sigma}$ отмечается и при отсутствии прокладки, однако $\bar{\sigma}$ в этом случае при тех же углах метания в 1,5—2 раза меньше. В отдельных экспериментах и при отсутствии прокладки отмечались высокие значения σ_i , но видимая неустойчивость сварного процесса (отдельные непровары по длине образца в случаях $\alpha=8^\circ$ и 10°) существенно снизили $\bar{\sigma}$. Наличие прокладки как вытекает из этих экспериментов, оказывает на прочность сварного соединения весьма благоприятное стабилизирующее влияние.

Поступила в редакцию
17/XII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. J. Walsh, R. Shreffler, E. Willig. J. Appl. Phys., 1954, 24, 3.
3. Л. В. Овсянников. Лекции по основам газовой динамики. Новосибирск, НГУ, 1967.
4. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.

УДК 539.89 : 546.273+546.39

К ВОПРОСУ ОБ ОБРАЗОВАНИИ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА ПРИ УДАРНОМ СЖАТИИ

*Т. В. Бавина, О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин,
С. В. Першин
(Черноголовка)*

Сведения об образовании кубического (сфалеритоподобного) нитрида бора в результате ударного сжатия графитоподобной формы этого соединения достаточно противоречивы. Авторы [1—4] в сохраненных образцах кроме графитоподобной формы обнаруживали только вюртцитоподобную модификацию. По данным [5, 6], нитрид бора после ударного сжатия содержал до 16% кубического нитрида бора, причем его содержание [5] увеличивалось с ростом температуры ударного сжатия. Согласно [7], конечный продукт после очистки от графитоподобной формы состоял почти целиком из кубической модификации и содержал лишь следы вюртцитоподобного нитрида бора. По мнению авторов [7], полученные ими результаты являются следствием особо жестких условий синтеза (сходящиеся ударные волны, температура ударного сжатия не ниже 3200 К), что в соответствии с [8] должно было способствовать образованию кубической модификации.

С целью проверки этого предположения в настоящей работе были получены плотные формы нитрида бора в условиях, описанных в [9]. Технический, хорошо закристаллизованный графитоподобный нитрид бора с пикнометрической плотностью $2,26 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ (2,26 г/см³) помещался в цилиндрическую ампулу сохранения. Плотность набивки с целью по-

вышения температуры ударного сжатия снижалась до $1 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ (1,0 г/см³). Ударное воздействие осуществлялось при помощи литого заряда ТГ 40/60 с «линзой» из пенопласта [9]. После ударного воздействия содержимое ампулы извлекалось, образовавшиеся плотные фазы очищались от графитоподобной формы химической обработкой. Выход смеси плотных фаз нитрида бора в этих условиях составлял около одного процента.

На рис. 1 рентгенограмма полученного очищенного продукта (в) сопоставлена с рентгенограммами вюртцитоподобной модификации нитрида бора, полученной методом ударного сжатия (б), и сфалеритоподобной модификации (а) по данным работы [8]. Аномально-большая интенсивность линии 2,09 Å и отчетливо выраженная линия 1,810 Å, соответствующая отражению 200 кубического нитрида бора, свидетельствуют о присутствии его в очищенном образце в количестве не менее 25—30%.

Таким образом, усиление ударного сжатия, сопровождающееся значительно более сильным нагреванием, действительно приводит к образованию кубической формы нитрида бора, хотя при этом и наблюдается резкое снижение плотных фаз.

В связи с изложенным интересно обратиться к результатам, полученным Джонсоном и Митчеллом [10] путем рентгенофазового анализа нитрида бора непосредственно во время ударного сжатия. Согласно их данным, ударное сжатие нитрида бора до давлений $145 \cdot 10^8$ и $205 \cdot 10^8$ Н/м² (145 и 205 кбар соответственно) не приводит к фазовому переходу, в то время как на кривых ударной сжимаемости (рис. 2), полученных в [1, 7, 11], фазовое превращение при этих давлениях уже регистрировалось. На самом деле, противоречия в названных данных нет. Превращение при указанных выше давлениях происходит, но не может быть зафиксировано в постановке опыта [10].

Дело в том, что ударная волна в графитоподобном нитриде бора после начала фазового перехода становится неустойчивой и распадается на две. Первая ударная волна сжимает вещество до давления начала превращения, вторая, более медленная, осуществляет это превращение. Скорость и давление первой волны постоянны и не зависят от амплитуды входящей в образец волны. В p, V -координатах скорость ударной волны изображается лучом, проведенным из точки, отвечающей началь-

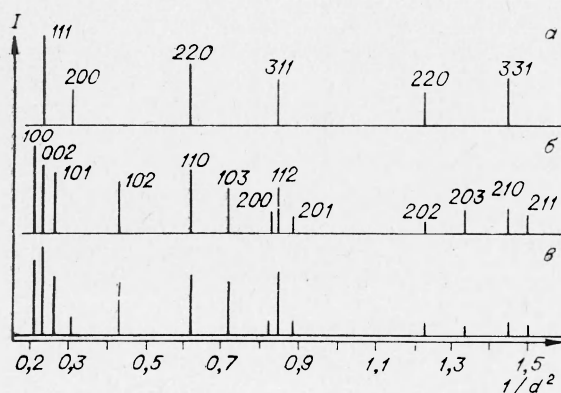


Рис. 1. Рентгенограммы кубического (а) и вюртцитоподобного (б) нитрида бора и смеси плотных фаз нитрида бора (в).

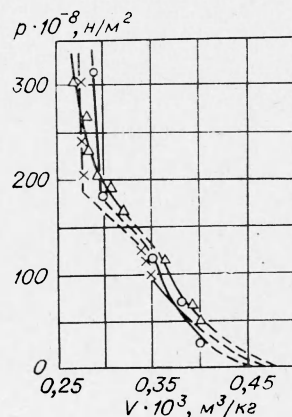


Рис. 2. Ударные адиабаты графитоподобного нитрида бора в координатах давление — удельный объем. X — данные работы [1]; O — [7]; Δ — [11].

ному состоянию вещества ρ_0 , V_0 , через точку начала превращения и отсекает выше этой точки на ударной адиабате закрытую область двуволнового сжатия. Выше этой области ударная волна вновь становится устойчивой и фазовые превращения осуществляются во фронте этой волны.

Положение верхней границы области двуволнового сжатия изменяется с изменением начальной плотности нитрида бора. При этом точка начала фазового превращения в силу слабой зависимости от температуры [10] является малоподвижной осью вращения луча постоянной скорости, начало которого с ростом начальной плотности сжимаемого вещества смещается влево вдоль оси удельных объемов, а точка его пересечения с ударной адиабатой, определяющая верхнюю границу двуволновой области, смещается вверх. Этому смещению способствует также смещение влево самой ударной адиабаты, поскольку с повышением плотности вещества уменьшается его разогрев при ударном сжатии до того же давления.

У графитоподобного нитрида бора с начальной плотностью $2 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ (2 г/см³) верхняя граница закрытой области соответствует давлению $192 \cdot 10^8$ Н/м² (192 кбар) [1]. Плотность образцов отожженного пиролитического нитрида бора в [10], очевидно, была выше этой величины. Поэтому вполне возможно, что граница области двуволнового сжатия поднялась в этом случае выше 205 кбар.

Таким образом, в [10] в двух случаях ($145 \cdot 10^8$ и $205 \cdot 10^8$ Н/м²) сжатие, по-видимому, осуществлялось двуволновой конфигурацией и в одном ($245 \cdot 10^8$ Н/м²) — одной ударной волной. Регистрация дифрактограмм в [10] производилась в рентгеновских лучах, отраженных от свободной поверхности образца, причем максимум импульса рентгеновского излучения длительностью $40 \div 50$ нс был синхронизирован с моментом выхода ударной волны на свободную поверхность.

Анализ дифрактограмм показал, что в первых двух случаях, несмотря на значительную разницу давлений ($145 \cdot 10^8$ и $205 \cdot 10^8$ Н/м²), отношение c/c_0 параметра кристаллической решетки графитоподобного нитрида бора в сжатом и ненагруженном состоянии практически одно и то же: 0,84 при $145 \cdot 10^8$ и 0,83 при $205 \cdot 10^8$ Н/м². Это и понятно, давление во фронте первой ударной волны, а следовательно, и степень сжатия вещества в ней не зависят от начального приложенного давления. Понятно также, почему в этих случаях не наблюдается превращения. После выхода первой ударной волны на свободную поверхность от нее во внутреннюю часть образца начинает распространяться волна разрежения. Ее взаимодействие со второй ударной волной, осуществляющей превращение, ведет к быстрому спаду давления ниже необходимого для фазового превращения, и поэтому на свободной поверхности оно не происходит.

Даже в тех случаях, когда давление во фронте второй ударной волны (например, $205 \cdot 10^8$ Н/м²) значительно превышает необходимое для фазового превращения ($130 \cdot 10^8$ Н/м²) и временное расхождение между первой и второй волнами невелико, и реализуется тот случай, когда к моменту выхода на свободную поверхность давление во фронте второй волны еще достаточно велико, несмотря на взаимодействие с волнами разрежения, превращение может остаться незарегистрированным. Если время между последними выходами на свободную поверхность первой и второй волн больше времени спада импульса рентгеновского излучения, максимум которого по времени совпадает с выходом первой волны, регистрации превращения не произойдет. Следует отметить, что интервал времени между последовательными выходами двух волн на свободную поверхность больше временного расхождения между волнами в самом образце к моменту выхода на свободную поверхность первой ударной волны. Это увеличение происходит в результате действия волны разрежения, которая снижает скорость второй волны и увеличивает ее путь к движущейся свободной поверхности.

При давлении $245 \cdot 10^8$ Н/м², когда превращение осуществляется во фронте одной волны, на рентгенограмме, полученной в [10], за времена не более 40—50 нс уже регистрировалось основное отражение вюртцитоподобной фазы с межплоскостным расстоянием, равным $2,20 \pm 0,02$ Å. Сканирование названного рефлекса на рентгенограмме при помощи денситометра показало, что рефлекс характеризуется «плечом», соответствующим по своему положению межплоскостному расстоянию $2,14 \pm \pm 0,03$ Å, природу которого авторы [10] не идентифицировали. Существенно, что на рентгенограмме, полученной при тех же $245 \cdot 10^8$ Н/м², но через 200 нс, отражение $2,20$ Å исчезало и оставалось только отражение $2,14$ Å.

С нашей точки зрения, зарегистрированное авторами [10] отражение, равное $2,14 \pm 0,03$ Å, может соответствовать самому интенсивному отражению ($2,10$ Å) кубического нитрида бора, а в сумме результаты [10] свидетельствуют о возможности образования кубического нитрида бора непосредственно в ударной волне через промежуточную стадию превращения графитоподобного нитрида бора в вюртцитоподобную форму, если давление во фронте ударной волны, а следовательно, и температура ударного сжатия достаточно высоки. Многоступенчатость ударного сжатия до того же давления сопровождается значительно меньшим нагреванием, и поэтому превращение вюртцитоподобного нитрида бора в кубическую форму может не реализоваться, что и наблюдалось ранее [1].

*Поступила в редакцию
12/XII 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ададулов, З. Г. Алиев и др. Докл. АН СССР, 1967, **172**, 5, 1066.
2. А. В. Курдюмов, Н. Ф. Островская и др. Докл. АН СССР, 1973, **209**, 5, 1081.
3. A. Sawaoka, T. Soma, S. Saito. Japan. J. Appl. Phys., 1974, **43**, 5, 890.
4. T. Soma, A. Sawaoka, S. Saito. Japan. Mat. Res. Bull., 1974, **9**, 755.
5. И. Н. Дулин, Л. В. Альтшулер и др. ФТТ, 1969, **11**, 5, 1252.
6. С. С. Бацанов, Л. Р. Бацанова и др. ЖСХ, 1968, **9**, 6, 1024.
7. N. L. Coleburn, J. W. Forbes. J. Chem. Phys., 1968, **48**, 2, 555.
8. W. P. Bundy, R. H. Wentorf. J. Chem. Phys., 1963, **38**, 1144.
9. Г. А. Ададулов, О. Н. Бреусов и др. ФГВ, 1971, **7**, 4, 589.
10. Q. Johnson and A. C. Mitchell. Phys. Rev. Letters, 1972, **29**, 20, 1369.
11. Л. В. Альтшулер, В. Н. Дракин, М. Н. Павловский. ЖЭТФ, 1967, **52**, 2, 400.

УДК 533.6.011.72

О РАСПРОСТРАНЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН ОТ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ГОРЯЧЕГО ОБЪЕМА

В. П. Левентуев, И. В. Немчинов

(Москва)

Предположим, что в неподвижной газообразной среде с плотностью ρ_0 и давлением p_0 в начальный момент имеется некоторая область возмущенного газа объемом V_n . В дальнейшем возмущение будет распространяться по окружающей «холодной» среде. Объем возмущенного газа