Письма в ЖЭТФ, том 111, вып. 12, с. 838 – 845

Плавление ударно-сжатого карбида бора

А. М. Молодец[1), *А. А. Голышев*, *Г. В. Шилов*

Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, Россия

Поступила в редакцию 27 апреля 2020 г.
После переработки 13 мая 2020 г.
Принята к публикации 13 мая 2020 г.

Цель данной работы заключалась в определении температуры плавления карбида бора при высоких давлениях ударного сжатия. Для этого порошкообразные образцы карбида бора подвергались сжатию ударными волнами амплитудой 60–80 ГПа. Образцы, испытавшие ударное сжатие, сохранялись для последующего электронно-микроскопического, рентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов. Факт плавления образца устанавливался по исчезновению границ между частицами сохраненного изначально порошкообразного образца. Давление и температура ударно-сжимаемых частиц порошкообразного карбида бора рассчитывались с помощью гидрокода, опирающегося на разработанные ранее уравнения состояния карбида бора и материалов экспериментальной сборки. Среднее значение температуры плавления карбида бора составило величину $T_{ml} = 1900(500)$ К при давлении $P_{ml} = 70(10)$ ГПа.

DOI: 10.31857/S1234567820120101

1. Введение. Как хорошо известно, карбид бора, являясь конструкционным и функциональным материалом ряда важных отраслей промышленности, имеет своеобразную и сложную кристаллическую структуру. Поэтому карбиду бора посвящена обширная научная литература фундаментального и прикладного характера (см. [1] и ссылки в ней). В этих публикациях немалое внимание уделяется физике высоких давлений карбида бора, где свое место занимают вопросы плавления карбида бора при высоких давлениях. Дело в том, что высокая температура плавления карбида бора при нормальных условиях, составляющая 2720(50) К, уменьшается с повышением давления. Этот факт был экспериментально установлен в [2] и было показано, что в диапазоне давлений до 8 ГПа наклон кривой плавления dT/dP равен $dT/dP = -13(6)$ К/ГПа.

Плавление карбида бора при высоких давлениях представляет интерес для ряда фундаментальных и прикладных задач. Например, броневые изделия из карбида бора являются перспективными элементами защиты в условиях высоких давлений и температур ударно-волнового и лазерного воздействия. Здесь давления достигают десятков гигапаскалей, и поэтому сведения о зависимости температуры плавления карбида бора от давления оказываются востребованными в расширенном диапазоне давлений (см., например, [3]).

В этой связи заметим, что линейная экстраполяция результата [2] прогнозирует низкотемпературное плавление карбида бора под давлением ≈ 50 ГПа при температуре ≈ 2000 К. В научной литературе имеются модельные уточнения барической зависимости температуры плавления карбида бора в мегабарной области давлений. Так, в [4] в рамках однокомпонентной модели плавления показано, что отрицательный наклон кривой плавления карбида бора может сохраняться до 40 ГПа, когда температура плавления карбида бора снижается до 2200 К. В отличие от этого в [5] в рамках двухкомпонентной модели область низкотемпературного плавления карбида бора прогнозируется вплоть до 100 ГПа и температуры плавления до 1100 К. В такой ситуации представляются актуальным получение экспериментальных данных о значениях температуры плавления карбида бора в мегабарной области давлений.

Цель данной работы заключалась в получении экспериментально-расчетной оценки температуры плавления карбида бора при высоких давлениях ударного сжатия. Для этого порошкообразные образцы карбида бора подвергались сжатию ударными волнами амплитудой 60–80 ГПа. Образцы, испытавшие ударное сжатие, сохранялись для последующего анализа – электронно-микроскопического, рентгеноспектрального и рентгеноструктурного. Факт плавления образца устанавливался по превращению порошкообразного образца в монолитный материал. Давление и температура ударно-сжимаемых частиц порошкообразного карбида бора рассчитывались аналогично [6].

2. Материал, образцы и экспериментально-расчетная методика. Ударному нагружению и по-

1)e-mail: molodets@icp.ac.ru

следующему сохранению подвергались порошкообразные образцы карбида бора с размером кристаллических частиц менее 10 мкм производства Sigma Aldrich, артикул 378119-50G, которые использовались ранее в [6] и характеристики которых также приведены в [6]. Техника взрывного нагружения и последующего сохранения образцов порошкообразного карбида бора была аналогична ранее применявшейся в [6, 7]. Применительно к данной работе эта техника представлена на рис. 1a. Были проведены эксперименты с использованием молибденовых и стальных ударников. В первом случае давления в образцах карбида бора достигали 80 ГПа, во втором – 60 ГПа (для удобства изложения в дальнейшем будем использовать сочетание "высокие давления" для 80 ГПа и "пониженные давления" для 60 ГПа). Ударно-волновое нагружение экспериментальной сборки рис. 1 осуществлялось ударом ударника *1* толщиной h_0, разогнанного до скорости W_0 продуктами взрыва заряда взрывчатого вещества. Порошкообразный образец карбида бора помещался под вольфрамовым диском *2*. Начальная плотность образца составляла $\rho_{00} = 1.29(1)$ г/см^3, начальная температура составляла ≈ 300 K. Полученная "слойка" *2–3* располагалась в посадочном месте ампулы сохранения *4* так, чтобы толщина закрывающего слоя со стороны удара (крышки ампулы) составляла 5 и 10 мм в случае высоких и низких давлений соответственно. Высота и диаметр ампулы сохранения составляли 45 и 48 мм. Ампула сохранения, содержащая вольфрамовый диск и образец, вставлялась в охранное стальное кольцо *5* диаметром 200 мм.

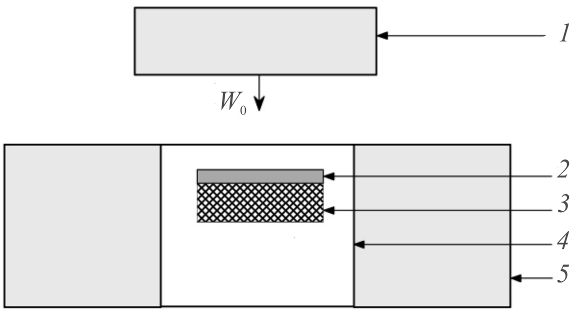

Рис. 1. Постановка экспериментов по ударно-волновому нагружению и сохранению порошкообразных образцов карбида бора. *1* – металлический (молибден или нержавеющая сталь Х18Н10Т), имеющий, соответственно, скорость и толщину (W_0, h_0) для молибдена ($W_0 = 3.5(1)$ км/с, $h_0 = 2.0$ мм), для стали ($W_0 = 2.6(1)$ км/с, $h_0 = 3.5$ мм); *2* – вольфрамовый диск толщиной 1.55 мм и диаметром 24 мм; *3* – порошкообразный образец карбида бора диаметром 24 мм и высотой 2.45 мм; *4* – ампула сохранения из нержавеющей стали Х18Н10Т; *5* – стальное охранное кольцо

После ударно-волнового нагружения ампула сохранения извлекалась из охранного кольца и обрабатывалась на токарном станке так, чтобы обеспечить доступ к образцу. На рисунке 2a показан сохраненный образец в эксперименте с молибденовым ударником после снятия крышки ампулы. Для дальнейших исследований этого образца использовались фрагменты центральной его части, очерченные квадратами *1* и *2*, которые располагались вдали от областей неодномерного течения, расположенных на краях образца.

Фрагмент *1* анализировался на сканирующем электронном микроскопе Zeiss Supra 25 и на рентгеноспектральной установке INCA x-sight. При этом анализировались центральные участки поверхности излома образца, расположенной приблизительно перпендикулярно плоскости ударной волны. Эта поверхность соответствует плоскости xy на рис. 2b. Принадлежность информации к этой плоскости отмечается в дальнейшем символом SEM$_{xy}$. Полученная SEM$_{xy}$-информация представлена на рис. 3a, c, e.

Также анализировалась поверхность образца, расположенная параллельно плоскости ударной волны. Эта плоскость соответствует плоскости zy на рис. 2b. Плоскость zy характерна тем, что она являлась поверхностью контакта образца с вольфрамовой пластиной и поэтому заведомо содержит вольфрам помимо карбида бора. Принадлежность информации к этой плоскости отмечается в дальнейшем символом SEM$_{zy}$. Полученная SEM$_{zy}$-информация представлена в виде электронно-микроскопического изображения на рис. 4a и в виде спектра на рис. 4b. Этот спектр соответствует следующему процентному соотношению бора, углерода и вольфрама: 61.84 ат. %B, 30.82 ат. %C, 7.33 ат. %W.

После электронно-микроскопического и рентгеноспектрального анализов измерялась плотность ρ_0 фрагментов *1* и *2* сохраненного (см. рис. 2a) образца. Плотность определялась методом гидростатического взвешивания. Значение ρ_0 составило $\rho_0 = 2.51(5)$ г/см^3. Затем фрагмент *2* вместе с фрагментом *1* разбивались на осколки, которые измельчались в агатовой ступке для последующего снятия порошковых XRD-рентгенограмм.

Итак, информация на рис. 2–4 относится к образцу карбида бора, сохраненному в эксперименте с молибденовым ударником. В экспериментах со стальным ударником сохраненные образцы пред-

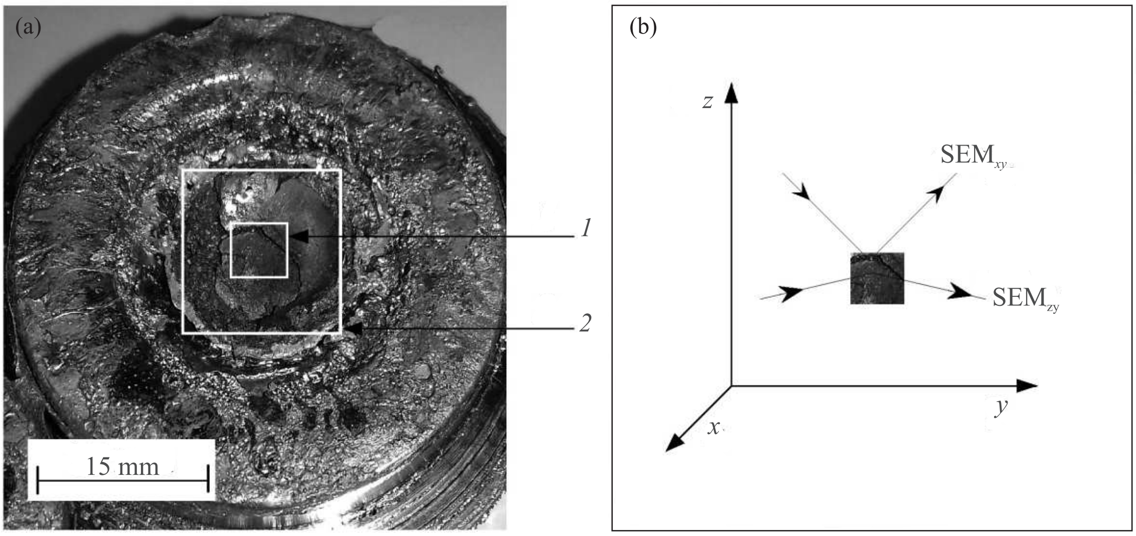

Рис. 2. Сохраненный, ставший монолитным, образец карбида бора и ориентация исследуемых поверхностей образца в экспериментах с молибденовым ударником. (a) – *1* – фрагмент образца для исследования на сканирующем электронном микроскопе (SEM) и рентгеноспектральной установке (INCA); *2* – фрагмент образца для исследования на рентгеновском дифрактометре (XRD). (b) – x, y, z – пространственные координаты, иллюстрирующие ориентации исследуемых поверхностей образца *1* относительно излучения SEM

ставляли собой уплотненный порошок не связанных или слабо связанных между собой частиц. Для этих экспериментов проведены лишь измерения порошковых рентгенограмм. В обоих случаях порошковые исследования проводились на дифрактометре ARLX'TRA, θ–θ геометрия съемки, твердотельный детектор, с использованием CuK_α излучения с длиной волны $\lambda = 1.5406$ Å, шагом сканирования $\Delta(2\theta) = 0.01°$ или $\Delta(2\theta) = 0.02°$ и временем измерения в точке 1 с. Поученные XRD-рентгенограммы представлены на рис. 5.

Давление и температура ударно-сжимаемых частиц порошкообразного карбида бора рассчитывались с помощью гидрокода, опирающегося на разработанные ранее уравнения состояния карбида бора и материалов экспериментальной сборки. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

3. Обсуждение рентгеноспектрального и электронно-микроскопического анализов. Обсудим результаты рентгеноспектрального и электронно-микроскопического анализов сохраненных образцов, представленные на рис. 3. Изучаемые участки SEM$_{xy}$ на рис. 3a не соприкасались с вольфрамовой пластиной и ампулой сохранения. Поэтому они практически не содержат загрязняющих частиц вольфрама и нержавеющей стали, а также возможных продуктов реакции, образующихся в ампуле при ее взрывном нагружении. Это подтверждается спектром на рис. 3b, который выявляет только бор и углерод в соотношении 75(3) ат. % B и 25(3) ат. % C.

На рисунке 3a светлой рамкой очерчен участок, показанный при большем увеличении на рис. 3c и e. На рисунке 3d и f представлены изображения исходных частиц при аналогичном увеличении. Сопоставление рис. 3c с рис. 3d и рис. 3e с рис. 3f свидетельствует, что в результате примененной ударно-волновой обработки с максимальными давлениями 80 ГПа микронные частицы карбида бора объединяются в монолитный бороуглеродный материал с плотностью $\rho_0 = 2.51(5)$ г/см^3. Представляется разумным соотнести этот факт с плавлением исходных частиц ударно-сжимаемого карбида бора, последующим их слиянием и затвердеванием.

4. Обсуждение порошковых рентгенограмм. Данные рентгеноспектрального и электронно-микроскопического анализов не позволяют судить о структуре образца карбида бора, испытавшего ударно-волновое воздействие. Поэтому рассмотрим рентгенограммы сохраненных образцов карбида бора, которые содержат информацию о кристаллической структуре образцов.

Как видно на рисунке 5 все семь рефлексов каждой из рентгенограмм *1*, *2*, *3* практически совпадают с местоположением рефлексов гексагонального карбида бора справочной рентгенограммы *4*. Таким об-

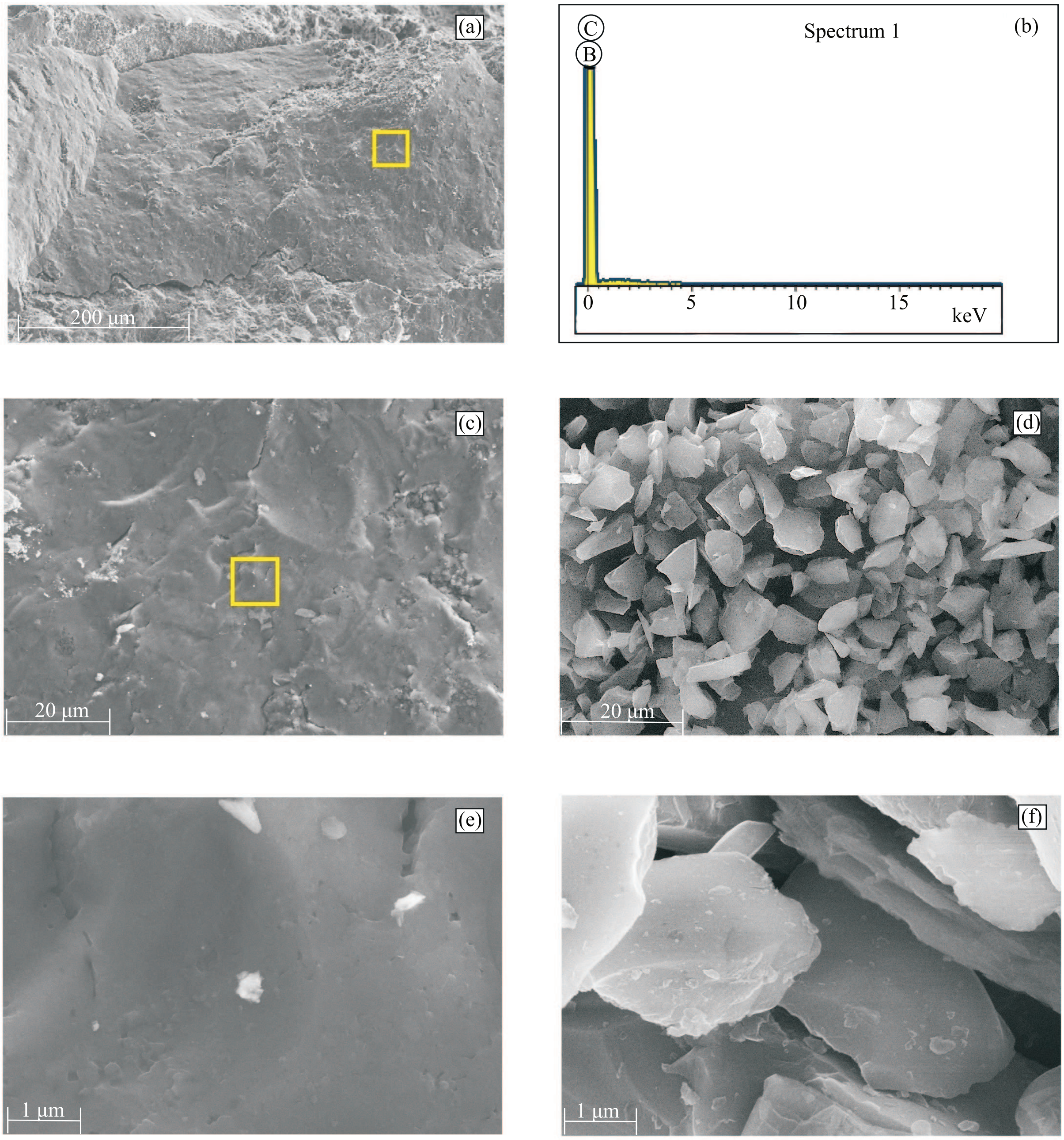

Рис. 3. (Цветной онлайн) SEM$_{xy}$-изображения образца карбида бора, сохраненного в эксперименте с высокими давлениями. (a), (c), (e) – Плоскости xy сохраненного образца карбида бора; (d), (f) – исходный порошкообразный образец; (b) – результаты рентгеноспектрального анализа плоскости xy сохраненного образца

разом, взрывная обработка как пониженными, так и высокими давлениями оставляет карбид бора в исходном кристаллическом состоянии. С учетом результатов электронно-микроскопического и рентгеноспектрального анализов для высоких давлений это означает разогрев образца до температур плавления при сжатии и последующую его кристаллизацию при разгрузке.

В то же время рентгенограмма *2* содержат новые рефлексы *5*. Это означает, что в проведенных экспериментах высокие давления стимулируют не только плавление, но и образование новых материалов. Часть рефлексов *5* можно отнести к боридам вольфрама, поскольку согласно рис. 4 рентгеноспектральный анализ выявляет присутствие вольфрама в исследуемых образцах. Так, рефлекс, обозначен-

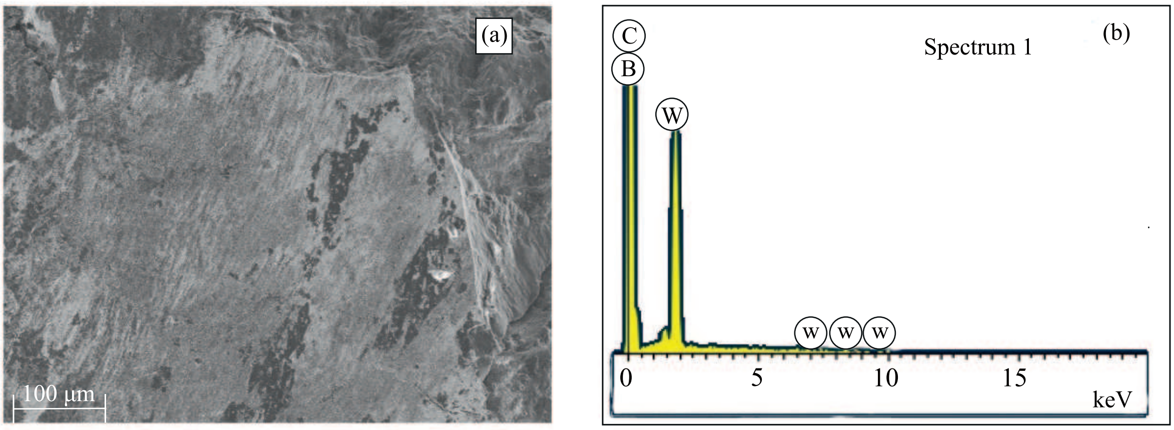

Рис. 4. (Цветной онлайн) SEM_{zy}-изображение образца карбида бора, сохраненного в эксперименте с высокими давлениями. (a) – Электронно-микроскопический снимок образца в плоскости zy; (b) – спектр рентгеноспектрального микроанализа плоскости zy сохраненного образца

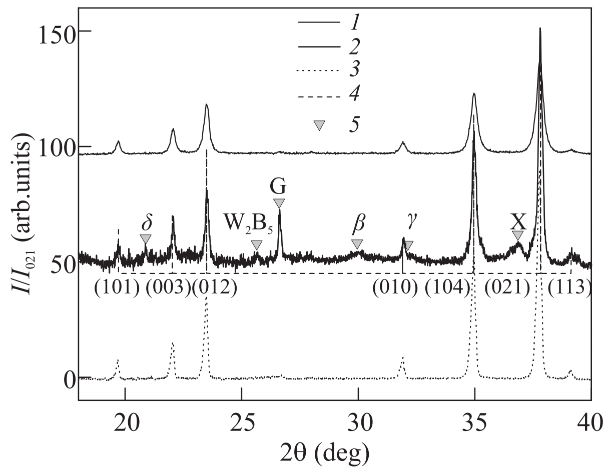

Рис. 5. Нормированные на интенсивность рефлекса (021) рентгенограммы образцов карбида бора в зависимости от двойного Брэгговского угла 2θ. *1* – образец, сохраненный после ударно-волнового нагружения стальным ударником до давления 60 ГПа; *2* – образец, сохраненный после ударно-волнового нагружения молибденовым ударником до давления 80 ГПа; *3* – порошкообразный образец карбида бора в состоянии поставки Sigma Aldrich; *4* – рентгенограмма карбида бора # 35-0798 из базы данных ICDD (цифрами в основании *4* указаны индексы рентгеновских отражений (hkl)); *5* – рефлексы, обусловленные новыми материалами, образовавшимися в результате ударно-волнового нагружения

ный δ, совпадает с одним из рефлексов моноборида вольфрама $\delta - \mathrm{W}$ рентгенограммы # 06-0635 базы ICDD, рефлекс, обозначенный β, – с одним из рефлексов моноборида вольфрама $\beta - \mathrm{W}$ рентгенограммы # 06-0541 базы ICDD, рефлекс, обозначенный γ, – с одним из рефлексов борида вольфрама $\gamma - W_2B$ рентгенограммы # 06-0591 базы ICDD, рефлекс, обозначенный W_2B_5 – с одним из рефлексов борида вольфрама W_2B_5 рентгенограммы # 30-1385 базы ICDD.

Среди других “посторонних” рефлексов *5* имеется рефлекс G, совпадающий с рефлексом графита рентгенограммы # 25-0284 базы ICDD. Ряд рефлексов в области рефлекса X, находящихся вблизи рефлексов (104) и (021) карбида бора, может относиться к продуктам реакции между образцом и сталью Х18Н10Т ампулы сохранения.

Отметим, что многочисленные новые рефлексы затрудняют расчет параметров решетки a и c гексагонального карбида бора по рефлексам (104) и (021), как это сделано в [6]. Однако этот расчет можно выполнить в диапазоне углов, свободном от “посторонних” рефлексов. Такой расчет a и c и их ошибок для рефлексов (003) и (012) рентгенограмм *1*, *2*, *3* по формулам (см. с. 80–91 [8]) был сделан, но во всех случаях дал примерно одинаковые значения a и c. Для экспериментов с высокими давлениями параметры элементарной ячейки составили $a = 5.599(3)$ Å, $c = 12.078(5)$ Å и, соответственно, объем элементарной ячейки $V_{uc} = 327.9(3)$ Å^3.

Обсудим форму рефлексов рентгенограмм на рис. 5. Отметим, что рефлексы рентгенограмм *1* и *2* сохраненных образцов оказываются подобно [6] симметричными и широкими по сравнению с этой характеристикой для исходного образца. Так, ширина рефлекса (012) на его полувысоте для *1*, *2* и *3* составляет 0.255(3)°, 0.156(4)° и 0.113(3)°. Оценка области когерентного рассеяния (ОКР) по формуле Селякова–Шрера дает для *1*, *2* и *3* величины $\text{ОКР}_1 \approx 350$ A, $\text{ОКР}_2 \approx 600$ A, $\text{ОКР}_3 \approx 800$ A. Таким образом, ОКР и соответствующий размер кристаллитов в сохранен-

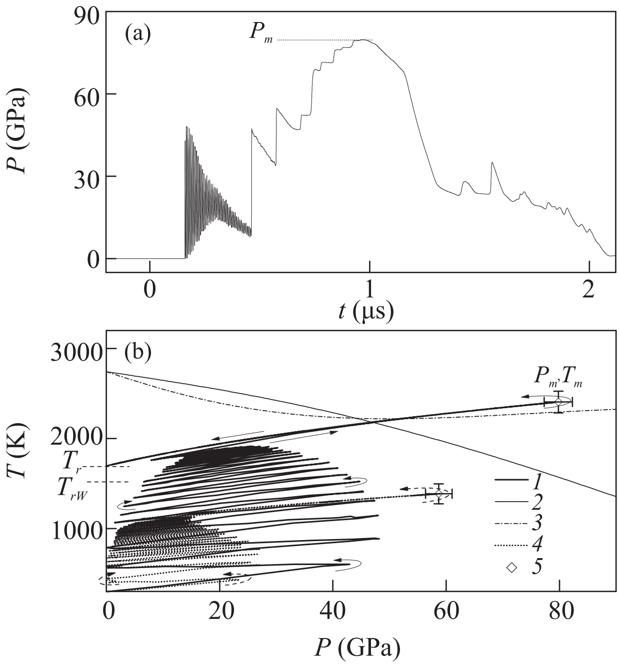

Рис. 6. Модельный профиль давления $P(t)$ нагружающего импульса сжатия (a) и расчетная фазовая траектория ударно-волнового сжатия карбида бора в координатах давление (P) – температура (T) (b). (b) – *1* – Расчетная фазовая траектория ударно-волнового циклического нагружения, ступенчатого ударного сжатия и изэнтропической разгрузки в эксперименте с высоким давлением; *2* – модельная линия плавления карбида бора из [5]; *3* – модельная линия плавления карбида бора из [4]; *4* – расчетная фазовая траектория ударно-волнового циклического нагружения, ступенчатого ударного сжатия и изэнтропической разгрузки в эксперименте с пониженным давлением; *5* – оценка погрешностей расчета термодинамического состояния ударно-сжимаемого карбида бора. Стрелками обозначено направление изменения давления и температуры в цикле сжатие-разгрузка. T_r и T_{rW} – остаточные температуры образца и контактирующего с образцом вольфрама непосредственно после разгрузки до нулевого давления

ных образцах КБ по мере повышения давления сначала уменьшается, а затем в образцах, испытавших плавление, увеличивается.

Рассмотрим далее расчет давлений и температур в выполненных экспериментах и сделаем оценку значений температуры плавления ударно-сжатого кристаллического КБ.

5. Расчетные значения давлений и температур карбида бора в проведенных экспериментах. Расчет давлений и температур в выполненных экспериментах проведем по трафарету [6] в рамках пластинчатой модели порошкообразного образца, в которой используется уравнение состояния кристаллической фазы карбида бора. Аналогично [6] реконструированная термодинамическая история нагружения в эксперименте по схеме рис. 1 представляет собой зависимости от времени t (профили) термодинамических переменных давления $P(t)$ и температуры $T(t)$ для модельных частиц. На рисунке 6a показан профиль давления $P(t)$ в серединной частице – пластине слоистого образца в условиях ударно-волнового эксперимента по схеме рис. 1 в случае нагружения молибденовым ударником. Историю давления в виде профиля $P(t)$ можно охарактеризовать следующим образом. На начальном этапе в течение ~ 0.3 мкс частицы подвергаются ударно-волновому циклическому нагружению. Затем, в течение ~ 0.5 мкс происходит ступенчатое ударное сжатие до максимального давления $P_m = 80$ ГПа. Затем следует изэнтропическая разгрузка от P_m до нулевых давлений в течение ~ 1.0 мкс.

Исключение времени из модельных профилей давления $P(t)$ и температуры $T(t)$ позволяет реконструировать историю нагружения частицы (фазовую траекторию) в координатах давление–температура. Эта фазовая траектория представлена графиком *1* на рис. 6b для частицы карбида бора, расположенной в середине порошкообразного образца. Как видно, после ударно-волнового циклического нагружения по мере достижения давления P_m происходит нагревание частиц до $T_m = 2400$ K.

Отметим, что в области точки (47 ГПа; 2018 K) фазовая траектория *1* пересекает модельные линии плавления карбида бора *2* из [5] и *3* из [4]. Если *2* и *3* правильно предсказывают плавление, то реальная фазовая траектория ударно-волнового сжатия должна отклонится от расчетной модельной траектории *1* кристаллического карбида бора в сторону меньших температур. Таким образом, расчетная температура T_m для эксперимента, в котором наблюдается образование монолитного конгломерата исходных частиц ударно-сжимаемого карбида бора на рис. 3, представляет собой максимальную оценку температуры плавления $T_{ml} = T_m$ карбида бора при давлении $P_{ml} = P_m$.

Грубую оценку минимальной температуры плавления ударно-сжатого карбида бора можно получить, опираясь на результаты экспериментов по сохранению с пониженным давлением при использовании стального ударника. Как отмечалось выше, в экспериментах с пониженным давлением сохраненные образцы представляли собой уплотненный порошок практически не связанных между собой частиц. Аналогичный расчет фазовой траектории для этого случая, в котором объединения и плавления частиц порошкообразного образца не происходило, показан пунктирным графиком *4* на рис. 6b. Здесь температура ударно-сжимаемого образца не превышала 1400 К при давлении 60 ГПа.

Отметим, что разогрев ударно-сжимаемых порошков обусловлен ударным сжатием и неодномерной пластической деформацией частиц порошка. Вклады обоих факторов могут быть сопоставимы для пластичных материалов, однако для хрупких материалов вклад второго фактора в разогрев макроскопических объемов образца невелик. Имеющие место дополнительный локальный разогрев кристаллического карбида бора [3], согласующийся с молекулярно-динамическими расчетами [9], происходит на пикосекундном временном и нанометровом пространственном уровнях, и, как отмечается в [9], в обычных экспериментах не регистрируется. Поэтому результаты сделанных модельных расчетов, в которых не предусматривается разогрев за счет неравновесного разогрева в нанометровых объемах, могут служить реалистическим прогнозом температуры ударного разогрева частиц карбида бора. В этом приближении основная погрешность выполненных расчетов температуры и давления определяется погрешностью скорости ударника W_0, которая задается как основной входной параметр в гидрокоде: $W_0 = 2.6(1)$ км/с для стального ударника и $W_0 = 3.5(1)$ км/с для молибденового ударника. Вариация величины W_0 в указанных пределах приводит к вариации величин P_m и T_m, которые указаны на рис. 6b в виде погрешностей этих величин.

Обсудим вероятность альтернативных механизмов образования монолитного конгломерата исходных частиц за счет процессов диффузии и рекристаллизации во время ударного сжатия, или во время остывании ампулы сохранения с ударно разогретым образцом.

Как известно, спекание порошков ковалентных объектов осуществляется при температурах $T_{\text{sint}} > 0.85\ T_{ml}$ за времена t_{sint} порядка 10^2 с (см. [1]). Для карбида бора величина T_{sint} составляет $T_{\text{sint}} \approx 2300$ K, что почти совпадает с величиной $T_m = 2400$ на рис. 6b. Однако время для спекания частиц карбида бора в процессе ударного сжатия за счет диффузии и рекристаллизации составляет величину 10^{-6} с (см. рис. 6a), что на восемь порядков меньше t_{sint}. Учитывая, что коэффициент диффузии уменьшается с увеличением давления, можно признать этот механизм образования монолитного конгломерата маловероятным из-за малых времен и высоких давлений ударного сжатия.

Рассмотрим величины остаточной температуры образца карбида бора $T_r = 1700$ K и остаточной температуры $T_{rW} = 1550$ K, контактирующего с образцом вольфрама (см. рис. 6b), до которых оказываются разогретыми эти материалы непосредственно после разгрузки до нулевого давления. В этом случае образец карбида бора находится при температуре $T_r \leq 1700$ (см. рис. 6b) в течение времени остывания, составляющего несколько минут. Однако в этом случае температуры T_r и T_{rW} оказываются на уровне 1700 K, что существенно меньше $T_{\text{sint}} \approx 2300$ K.

Таким образом, в целом микроструктурный анализ сохраненных образцов вместе с результатами расчета их термодинамического состояния позволяет обозначить область температур и давлений ударно-сжатого карбида бора, при которых в течение микросекундных времен происходит его плавление следующими соотношениями: $1400\ \text{K} < T_{ml} < 2400\ \text{K}$; $60\ \text{ГПа} < P_{ml} < 80\ \text{ГПа}$ и, соответственно, охарактеризовать среднее значение температуры плавления величиной $T_{ml} = 1900(500)$ K при давлении $P_{ml} = 70(10)$ ГПа.

В заключение сопоставим полученный результат с одним из результатов [9] молекулярно-динамического моделирования (см. рис. 5 в [9]) ударно-сжатого карбида бора. Этот результат приведен на рис. 7. Здесь *1* – конечное расчетное

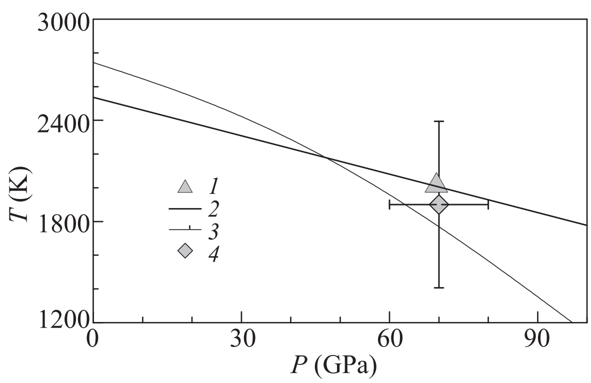

Рис. 7. Низкотемпературное плавление карбида бора в координатах температура (T) – давление (P). *1* – Молекулярно-динамическое моделирование состояния карбида бора при воздействии однократной ударной волны амплитудой 70 ГПа из [9], *2* – кривая плавления карбида бора из [3], используемая в [9], *3* – модельная кривая плавления карбида бора из [5], *4* – значение температуры плавления T_{ml} при давлении P_{ml}, полученное в данной работе

термодинамическое состояние моделируемого [9] кристалла карбида бора после его соударения со скоростью 2.5 км/с с жесткой стенкой. Для этого состояния в [9] рассчитана также эволюция его кристаллической структуры и показано, что по мере прохождения однократной ударной волны по образцу происходит деградация его кристаллической структуры и неравновесное нагревание. Согласно [9] этот результат предсказывает плавление ударно-сжатого карбида бора, начиная со скоростей 2.5 км/с, соответствующих давлению 70 ГПа.

На рисунке 7 представлены также кривая плавления *2* из [3], используемая в [9], кривая плавления *3* из [5] и значение *4* температуры плавления T_{ml} при давлении P_{ml}, полученное в данной работе. Как видно, все четыре результата согласуются между собой как по смыслу, так и количественно, подтверждая тем самым предположение об уменьшении температуры плавления карбида бора вплоть до сверхвысоких давлений.

6. Заключение. Проведены эксперименты по взрывному нагружению и последующему сохранению порошкообразных образцов кристаллического карбида бора ударно-волновыми импульсами длительностью около 2 мкс, амплитудой до ≈ 60 ГПа и 80 ГПа и ударным разогревом до температур ≈ 1400 K и 2400 K соответственно.

Электронно-микроскопический, рентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы сохраненных образцов свидетельствуют, что в результате примененной ударно-волновой обработки с максимальными давлениями 80 ГПа микронные частицы карбида бора объединяются в монолитный поликристаллический материал с плотностью $\rho_0 = 2.51(5)$ г/см^3. Этот факт соотнесен с плавлением исходных частиц ударно-сжимаемого карбида бора, последующим их слиянием и кристаллизацией.

Показано, что высокие давления ударного сжатия стимулируют не только плавление, но и образование новых материалов, в том числе, предположительно, боридов вольфрама и графита.

Определены размеры элементарной ячейки кристаллического карбида бора в образцах, испытавших плавление при ударном сжатии. Показано, что плавление карбида бора при ударном сжатии увеличивает размер области когерентного рассеяния сохраненных образцов.

Проведены расчеты давлений и температур в рамках пластинчатой модели порошкообразного образца, в которых реконструирована термодинамическая история ударно-волнового сжатия и разогрева в выполненных экспериментах.

В целом анализ сохраненных образцов вместе с результатами расчета их термодинамического состояния позволил обозначить область температур T_{ml} плавления карбида бора в заданной области давления P_{ml} следующими соотношениями: $1400\,\mathrm{K} < T_{ml} < 2400\,\mathrm{K}$; $60\,\text{ГПа} < P_{ml} < 80\,\text{ГПа}$. Соответственно среднее значение температуры плавления карбида бора составило величину $T_{ml} = 1900(500)$ K при давлении $P_{ml} = 70(10)$ ГПа.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии” и в рамках Госзадания # 0089-2019-0001 с использованием оборудования уникальной научной установки “Экспериментальный взрывной стенд” ИПХФ РАН, а также АЦКП ИПХФ РАН.

1. Р. А. Андриевский, Успехи химии **81**(6), 549 (2012).
2. В. А. Муханов, П. С. Соколов, В. Л. Соложенко, Сверхтвердые материалы **3**, 86 (2012).
3. S. Zhao, B. Kad, B. A. Remington, J. C. LaSalvia, C. E. Wehrenberg, K. D. Behler, and M. A. Meyers, PNAS **113**(43), 12088 (2016).
4. A. Shamp, E. Zurek, T. Ogitsu, D. E. Fratanduono, and S. Hamel, Phys. Rev. B **95**, 184111 (2017).
5. А. М. Молодец, А. А. Голышев, Д. В. Шахрай, ЖЭТФ **151**(3), 550 (2017).
6. А. М. Молодец, А. А. Голышев, Г. В. Шилов, ЖЭТФ **157**(3), 513 (2020).
7. А. М. Молодец, А. А. Голышев, Ю. М. Шульга, ЖТФ **83**(7), 100 (2013).
8. С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков, *Рентгенографический и электронографический анализ*, Металлургия, М. (1970), разд. I, с. 80, 91.
9. M. DeVries, Gh. Subhash, and A. Awasthi, Phys. Rev. B **101**, 144107 (2020).