

А.М. Молодец, А.А. Гольшев
Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка
Отдел экстремальных состояний вещества
Лаборатория физической химии высоких давлений

Введение

Как хорошо известно, карбид бора является важным конструкционным и функциональным материалом ряда важных отраслей промышленности и вместе с этим имеет своеобразную и сложную кристаллическую структуру. Поэтому карбид бора посвящена обширная научная литература фундаментального и прикладного характера. В этих публикациях немалое внимание уделяется физике высоких давлений карбида бора, где своё место занимают ударно-волновые эксперименты по исследованию сохранённых после сильного ударного сжатия образцов

S. Zhao, B. Kad, B.A. Remington, J.C. LaSalvia, C.E. Wehrenberg, K.D. Behler, and M.A. Meyers
"Directional amorphization of boron carbide subjected to laser shock compression"//PNAS. 2016, Vol.113, P. 12088.

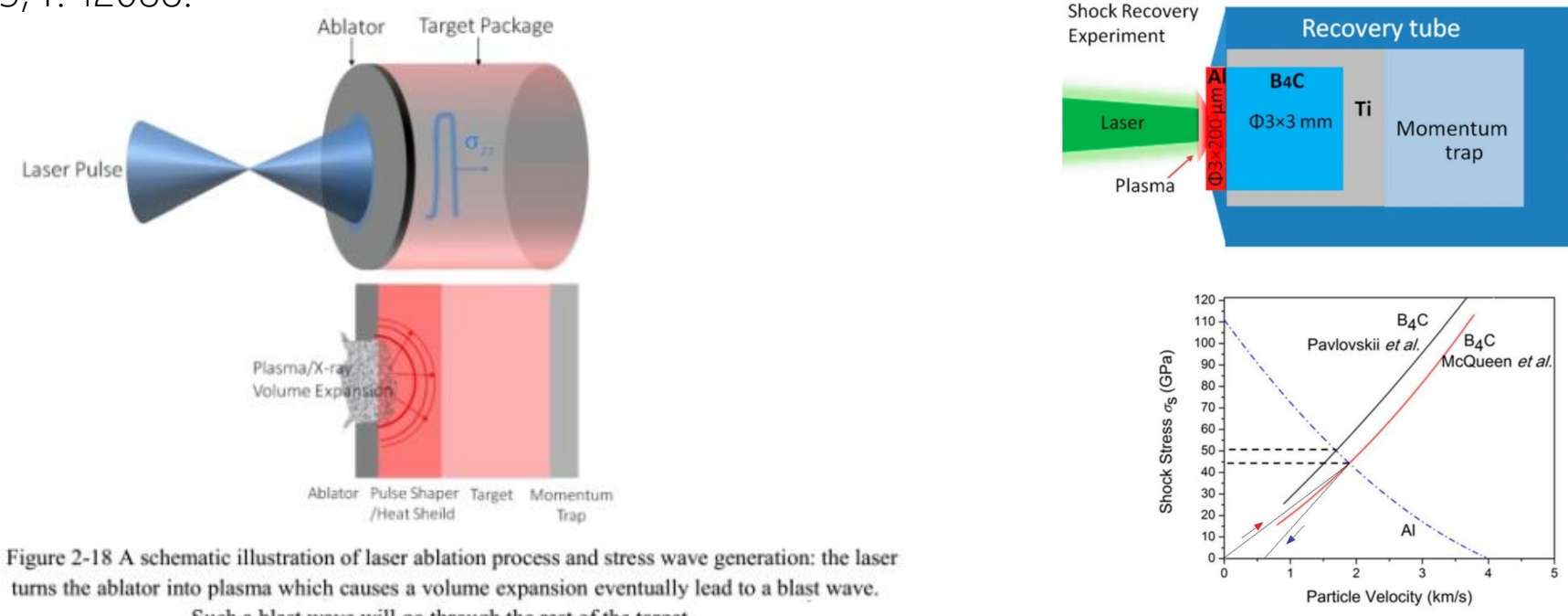
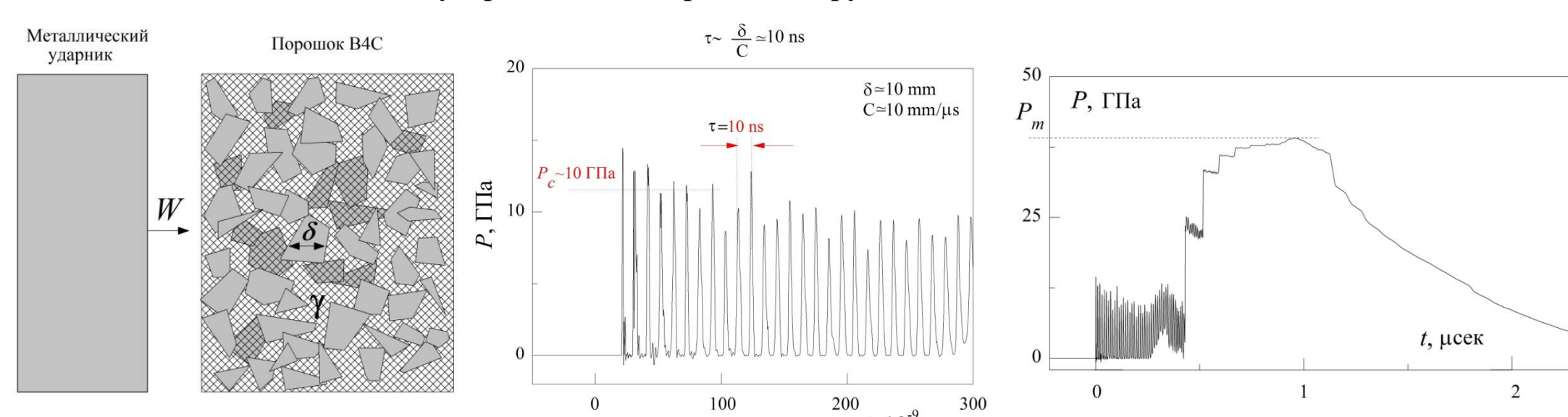


Figure 2-18 A schematic illustration of laser ablation process and stress wave generation: the laser turns the ablator into plasma which causes a volume expansion eventually lead to a blast wave. Such a blast wave will go through the rest of the target.

Здесь представлен пример современных исследований в этом направлении. Здесь наклеенный на поликристаллический образец алюминиевый аблятор подвергается мощной лазерной вспышке, что инициирует в образце однократный импульс давления с амплитудой ~50 ГПа и длительностью около 10 наносекунд. С тыльной стороны образца располагается устройство сохранения в который попадает образец, испытавший однократное ударно-волновое воздействие. Свойства этих сохранённых образцов сравниваются с исходными.

В нашем отделе имеется возможность осуществлять циклическое ударно-волновое воздействие гигапаскальных амплитуд на микронные частицы карбида бора. Так если произвести сильный удар металлической пластиной по порошку, состоящему из микронных частиц, то в результате многочисленных взаимных столкновений в отдельной частице возникнет циклический ударно-волновой режим нагружения.

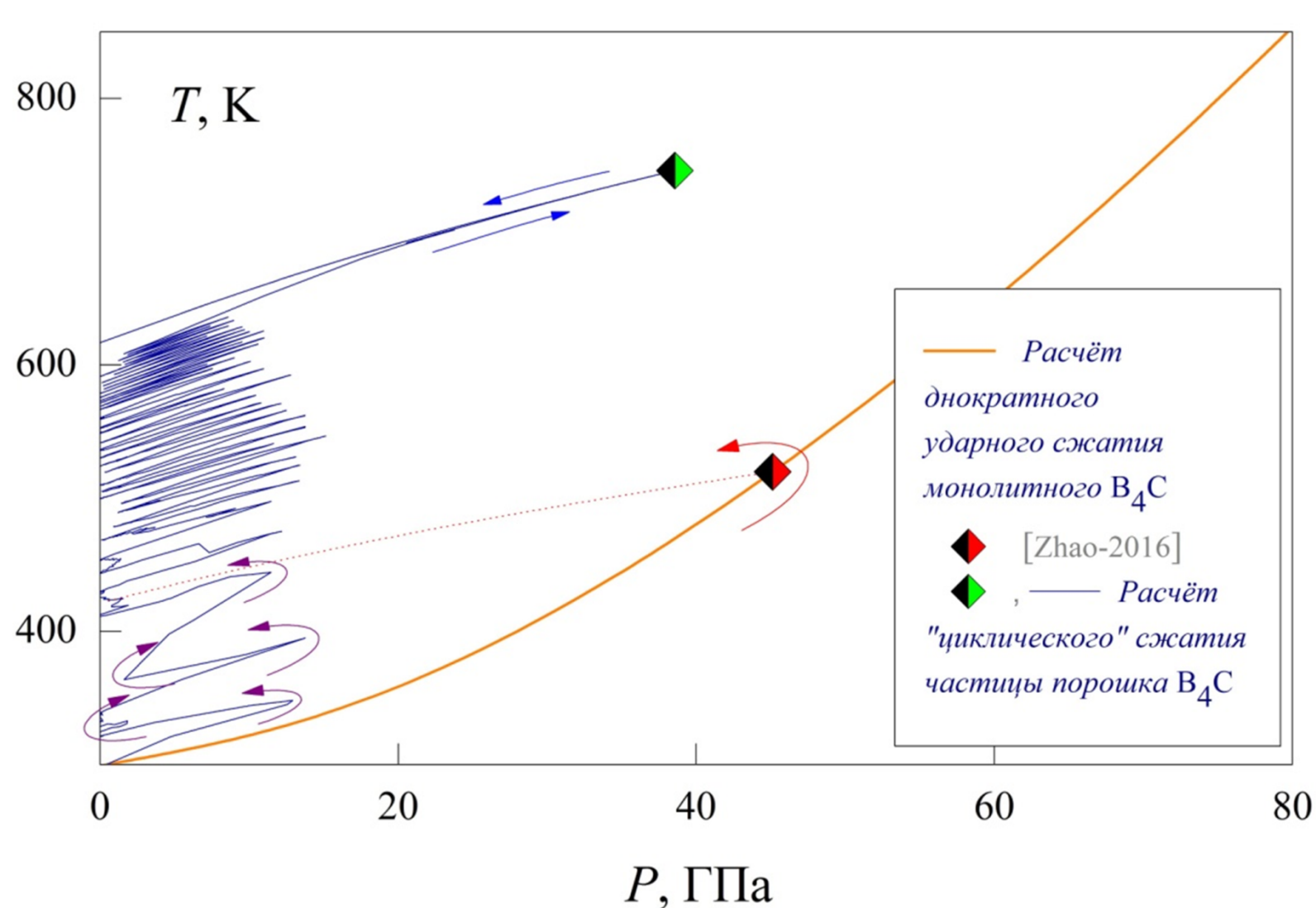


Модельные расчёты показывают, что в случае километровых скоростей ударника и микронных частиц этот режим будет длиться около сотен наносекунд. В целом же история нагружения в наших устройствах содержит и фазу ступенчатого ударного сжатия до давлений 50 ГПа, показанную на рисунке P(t).

Таким образом, у нас имеется возможность провести опыты при 50 ГПа по воздействию циклического ударно-волнового сжатия на кристаллический карбид бора и сравнить результат с литературными результатами, полученными при однократном ударно-волновом нагружении кристаллов карбида бора.

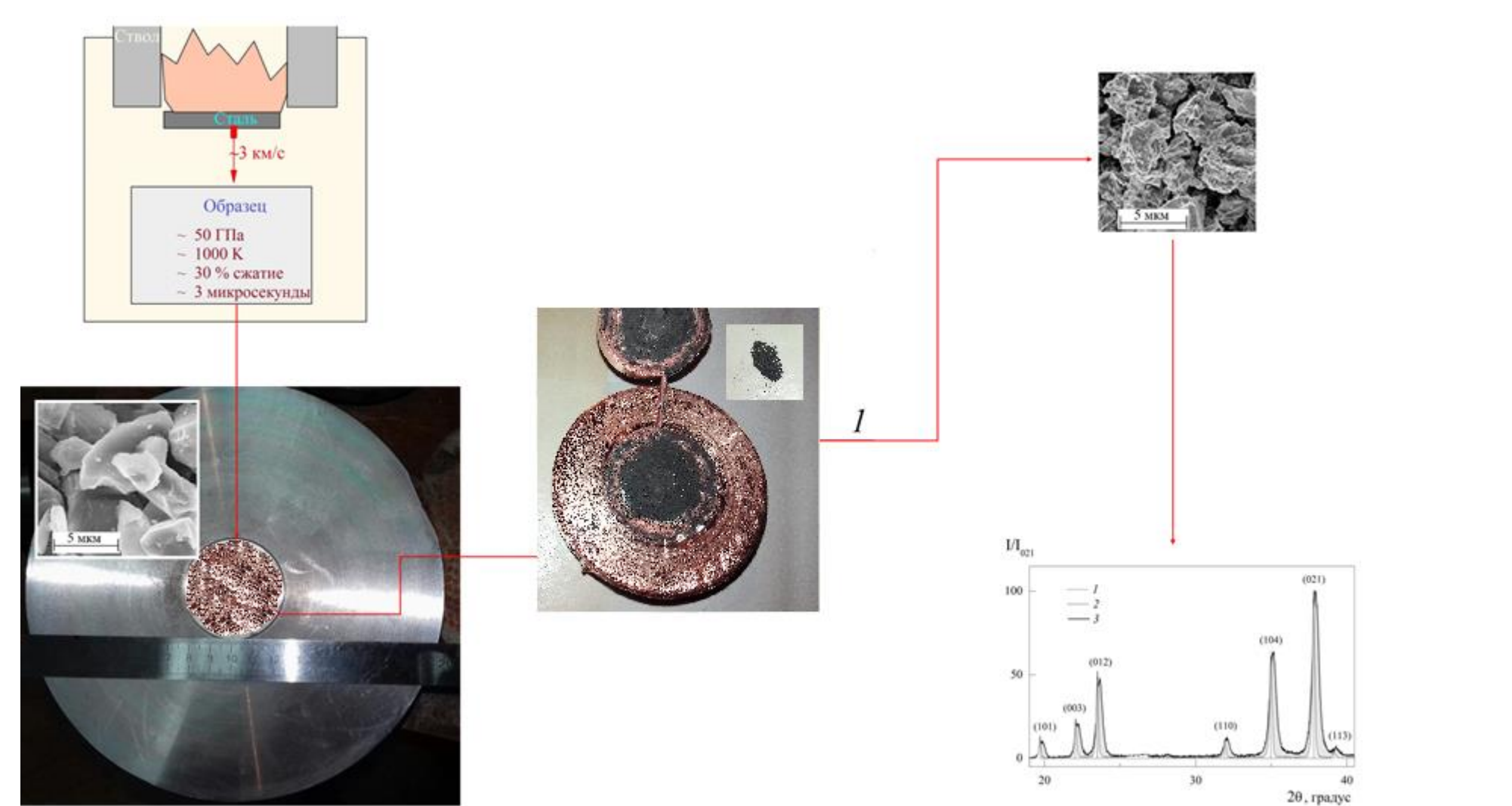
Цель работы

Модельные расчёты показывают также, что эти два режима – режим однократного ударного сжатия и режим циклического ударно-волнового нагружения при одинаковых максимальных давлениях ~50 ГПа существенно отличаются в координатах давление и температура.



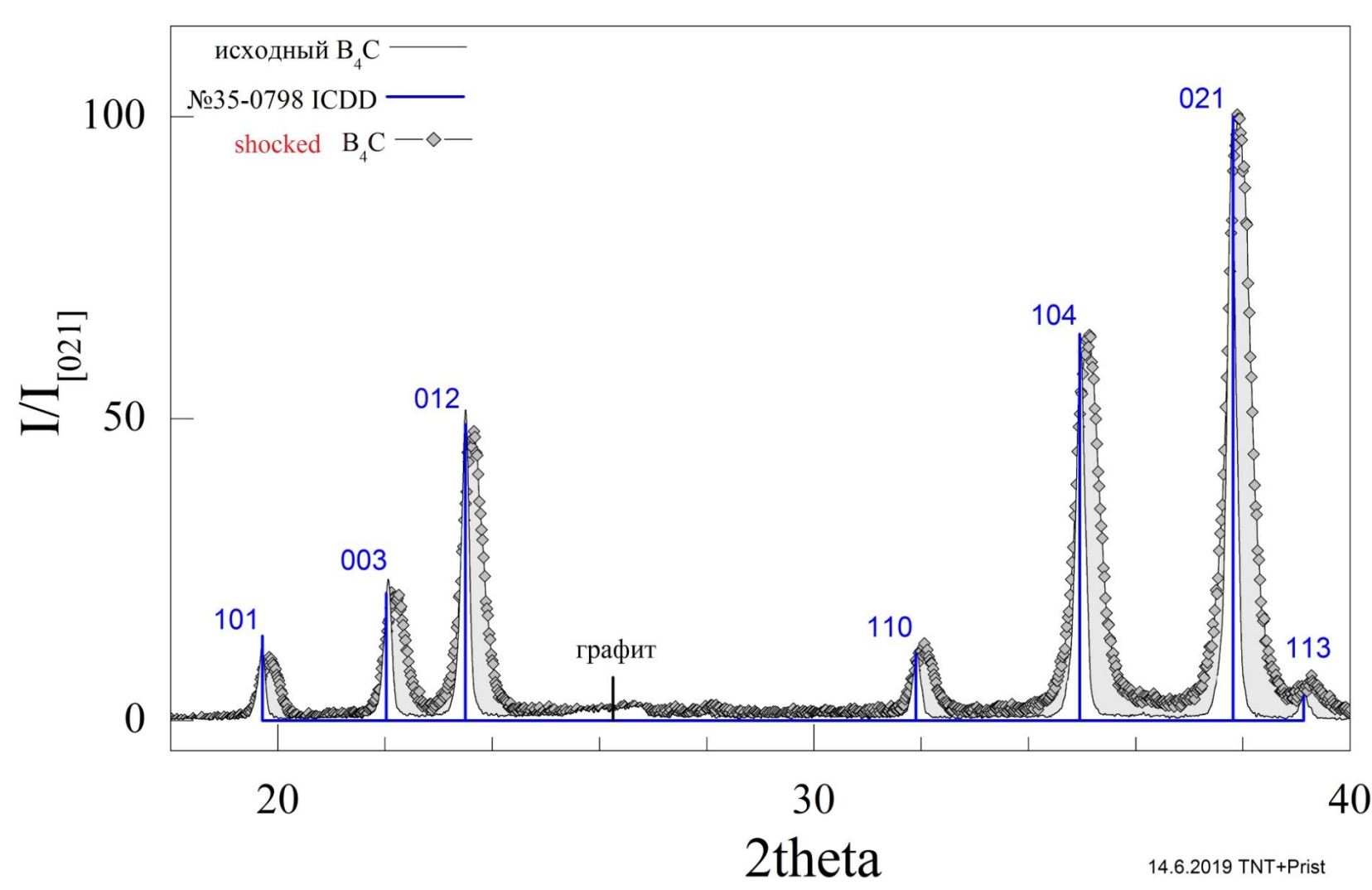
В связи с этим, цель докладываемой работы заключалась в том, чтобы выяснить возникают ли новые эффекты при таком режиме нагружения и если возникают, то определить их величину.

Методическая оснастка взрывного эксперимента



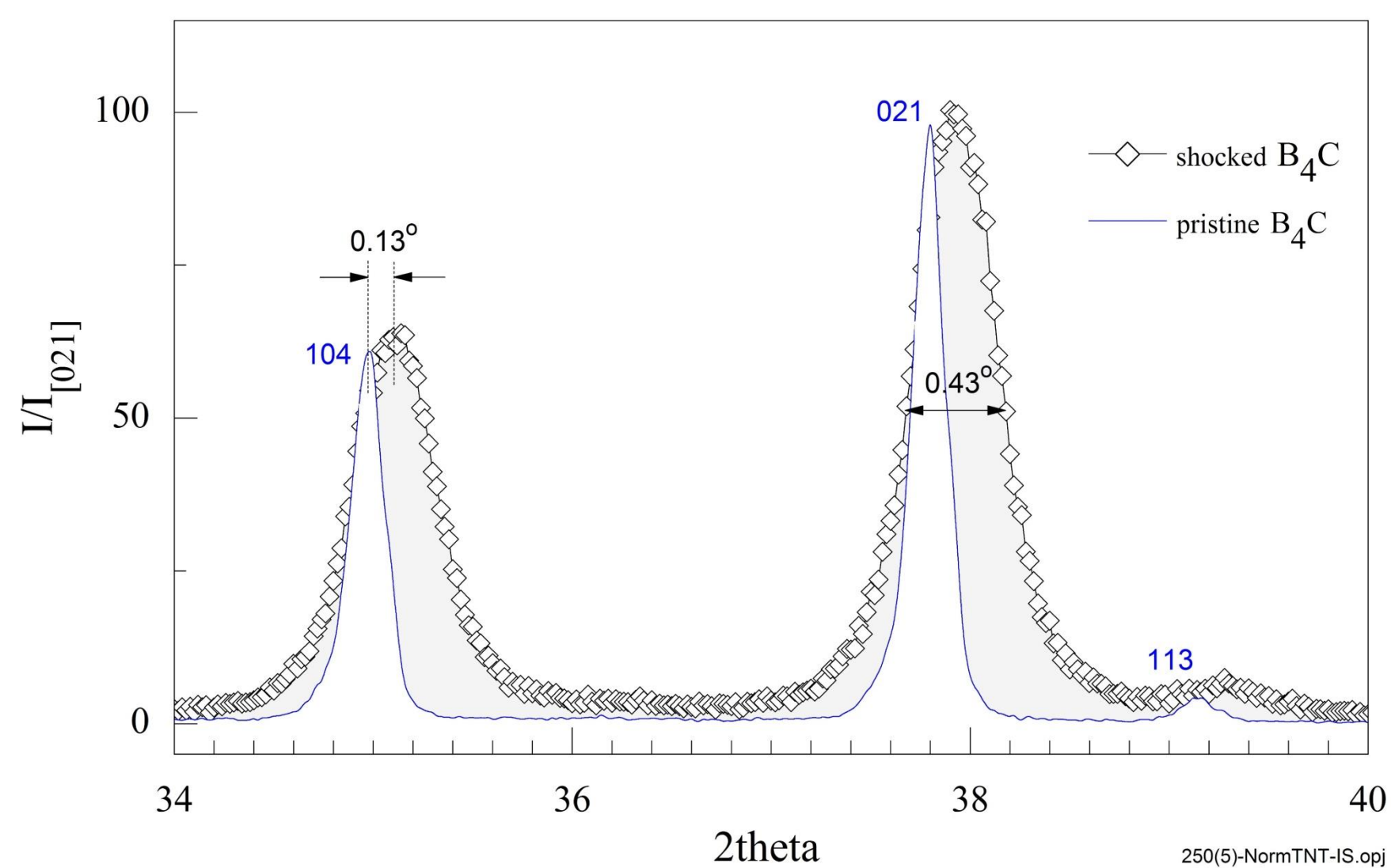
Здесь показана используемая схема эксперимента по нагружению и сохранению порошкообразных образцов кристаллического карбида бора. Исходный образец В4С заключён в медную ампулу сохранения. После взрывного нагружения она вскрывается на токарном станке, образец размельчается и исследуется на рентгеновском дифрактометре.

Дифрактограммы исходного и обработанного взрывом В4С



Здесь показаны дифрактограммы исходного образца, образца из базы данных ICDD и обработанного взрывом сохранённого образца. Сопоставление этих дифрактограмм позволяет заключить, после взрывного воздействия рефлексы гексагонального карбида бора сдвинулись в сторону больших углов и испытали трёхкратное уширение

Главные результаты доклада



1. Сильное взрывное воздействие амплитудой 50 ГПа, включающее ударно-волновое циклическое нагружение, необратимо уменьшает параметры элементарной ячейки гексагонального карбида бора, что свидетельствует об уменьшении объёма элементарной ячейки кристалла на ~1%.
2. Уплотнение кристаллического карбида бора сопровождается измельчением области когерентного рассеяния в кристаллическом карбиде бора до ~200 Å.

Сравнение эффектов однократного и циклического ударно-волнового сжатия

Duffy T. "High-pressure polymorphism of two high-strength ceramics: Boron carbide (B4C) and silicon carbide (SiC)". United States: N. p., 2017 Web. doi:10.2172/1406133 2172/1406133.

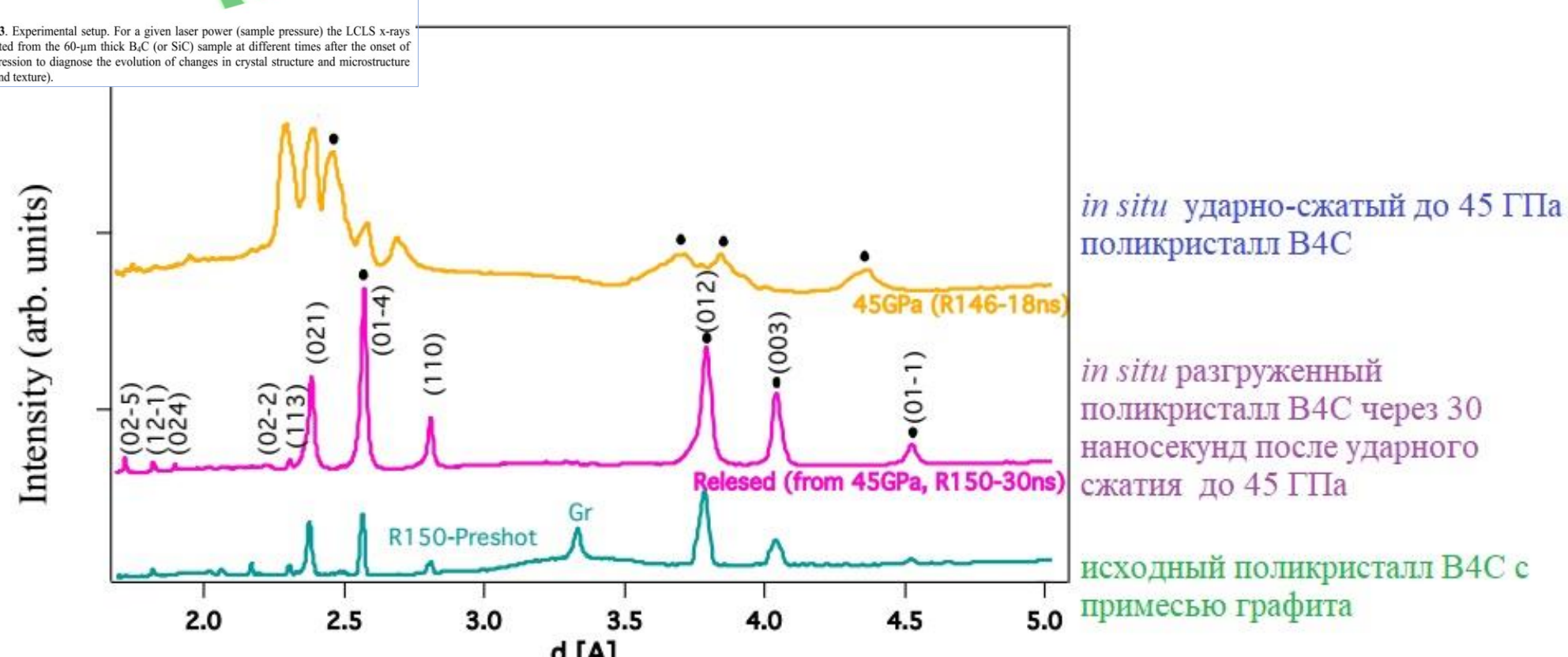


Figure 12. Representative integrated X-ray diffraction patterns for boron carbide. (hkl) values for selected peaks are indicated.

В работе [Duffy], где поликристаллический образец испытал однократное ударно-волновое нагружение уплотнение разгруженного В4С не наблюдается.

Таким образом, уплотнение кристаллического карбида бора в результате ударно-волнового циклического нагружения в наших экспериментах представляет собой новый эффект, который отсутствует при однократном ударном сжатии В4С

Заключение

Научные результаты:

1. Ступенчатое взрывное воздействие амплитудой 50 ГПа, включающее ударно-волновое циклическое нагружение, необратимо уменьшает параметры элементарной ячейки гексагонального карбида бора, что свидетельствует об уменьшении объёма элементарной ячейки кристалла (уплотнении) на ~1%.
2. Уплотнение кристаллического карбида бора сопровождается измельчением области когерентного рассеяния в кристаллическом карбиде бора до ~200 Å.

Новизна результатов: Уплотнение кристаллического карбида бора в результате ударно-волнового циклического нагружения представляет собой новый эффект, который отсутствует при однократном ударном сжатии поликристаллического В4С.

Практическая значимость результатов: Отлажен технологический приём изменения свойств карбида бора - важного конструкционного и функционального материала.

Продолжение исследований: Поиск оптимальных параметров ударно-волнового циклического и ступенчатого ударного сжатия для целенаправленного изменения величины уплотнения кристаллического карбида бора с продвижением в область давлений до ~100 ГПа.

Авторы признательны Г.В. Шилову за измерения дифрактограмм и за их плодотворные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии»
Результаты опубликованы в ЖЭТФ, 2020, том 157, вып.3, стр. 513-522.
