
МОРФОЛОГИЯ И СТРУКТУРА ШИХТЫ ДЕТОНАЦИОННОГО НАНОАЛМАЗА, ДОПИРОВАННОЙ БОРОМ

© 2022 г. О. А. Шилова^{1, 2}, Г. П. Копица^{1, 3}, Т. В. Хамова^{1, *}, Ю. Е. Горшкова⁴, А. Е. Баранчиков⁵, В. Ю. Долматов⁶

¹Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ”,
ул. Профессора Попова, 5, Санкт-Петербург, 197376 Россия

³Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ “Курчатовский
институт”, мкр. Орлова роща, 1, Гатчина, Ленинградская обл., 188300 Россия

⁴Объединенный институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, Московская обл., 141980 Россия

⁵Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН,
Ленинский просп., 31, Москва, 119991 Россия

⁶СКТБ “Техноло”, Советский пр., 33-А, Санкт-Петербург, 192076 Россия
*e-mail: tamarakhmatova@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 06.10.2021 г.

Принята к публикации 08.10.2021 г.

Два варианта порошков шихты детонационного наноалмаза, легированной 0.96 и 0.73 мас. % бора, получали взрывом с использованием смеси тротила с гексогеном (50/50) или тетрила соответственно. Их морфология, текстура и мезоструктура были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии, малоуглового рассеяния нейтронов и низкотемпературной адсорбции азота. Обнаружено значительное влияние прекурсора взрыва на структуру и морфологию полученных углеродных нанопорошков.

Ключевые слова: углеродные наночастицы, детонационный наноалмаз, заряд подрыва, допированная шихта детонационного наноалмаза, морфология поверхности, мезоструктура

DOI: 10.31857/S0132665122010140

ВВЕДЕНИЕ

Детонационный наноалмаз, начиная с середины XX в., не перестает быть объектом научных исследований, поскольку обладает рядом технически ценных свойств, а также биологической активностью, в том числе фунгицидной [1–12]. Его стоимость достаточно высока. Существенно дешевле в ряде случаев использовать шихту детонационного наноалмаза. Это промежуточный продукт, который получен в процессе взрыва, но не прошел все степени дорогостоящей очистки от графита и других примесей. Стоимость алмазной шихты в 3–5 раз меньше, чем стоимость очищенного наноалмаза (~\$300 за 1 кг). В то же время именно шихта может представлять практический интерес, например, при синтезе композиционных материалов и покрытий [13]. Она может найти применение в сельском хозяйстве в качестве недорогого реагента, обладающего полезными для растений свойствами [14]. Особенно интересна шихта детонационно-

Таблица 1. Состав порошков шихты детонационного наноалмаза, обогащенной бором, полученной из зарядов подрыва разного состава

Заряд подрыва	Содержание компонентов, % мас.			
	ДНА	Несгораемые примеси	Бор	Неалмазные формы углерода
Тротил–гексоген, 50/50	14.7	3.5	0.96	80.84
Тетрил	39	33.3	0.73	26.97

го наноалмаза, обогащенная полезными для растений элементами, например, бором. Такая шихта была синтезирована в СКТБ “Технолог” (Санкт-Петербург, Россия) [10]. В качестве заряда подрыва были использованы два варианта исходных веществ – смесь тротила и гексогена (1-ый) или тетрил (2-ой).

Алмазная шихта имеет сложную структуру. Этот инновационный продукт до настоящего времени изучен недостаточно.

Цель данной работы было – изучение структуры шихты детонационного наноалмаза, допированной бором, в зависимости от состава заряда, использованного для подрыва.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез шихты детонационного наноалмаза, обогащенной бором. Шихта детонационного наноалмаза, обогащенная бором, была получена взрывом с использованием в качестве заряда подрыва смеси тротила с гексогеном (50/50) или тетрила (2,4,6-тринитро-N-метил-N-нитроанилин).

В качестве допанта использовали некристаллический аморфный порошок бора, который получали спеканием борной кислоты с магнием по методике [15]. Полученный агломерат обрабатывали 15–20% раствором соляной кислоты при $70 \pm 2^\circ\text{C}$. Осадок промывали, сушили и прокаливали в вакууме. Результирующий порошок плотностью 2.3 г/см^3 содержал ~92–94 мас. % бора.

Допант вводили во взрывчатое вещество – тротил с гексогеном (ТГ) или тетрил в количестве 2.5 мас. %. Порошковую смесь тщательно перемешивали и прессовали при давлении 1500 кг/см^2 . Заряды имели диаметр 60 мм, длину 107–110 мм и массу 0.5 кг. Взрыв зарядов производили во взрывной камере Alfa-2М объемом 2.14 м^3 . Каждый заряд (ВВ) имел водную оболочку (ВВ : $\text{H}_2\text{O} = 1 : 10$). Полученный состав шихты детонационного наноалмаза после взрыва, приготовленный с использованием как тротила и гексогена, так и тетрила представлен в табл. 1.

Методы анализа

Сканирующая электронная микроскопия. Морфологию поверхности порошков шихты изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения Carl Zeiss N Vision 40, оснащенный детектором Oxford Instruments X-MAX (80 мм^2), при ускоряющем напряжении 1 кВ.

Низкотемпературная адсорбция азота. Анализ текстурных характеристик образцов шихты проводили методом низкотемпературной адсорбции азота с использованием анализатора QuantaChrome Nova 1200e. Перед измерениями проводили дегазацию образцов при 100°C в вакууме в течение 15–17 ч. Определение удельной площади поверхности образцов ($S_{\text{БЭТ}}$) проводили с использованием модели Брюнауэра–Эммета–Теллера по 7 точкам в диапазоне парциальных давлений азота $P/P_0 = 0.07–0.25$. Расчет распределения пор по размерам проводили анализом десорбционных ветвей полных

изотерм адсорбции–десорбции (в диапазоне парциальных давлений азота 0.01–0.99) с использованием модели Барретта–Джойнера–Халенды (БДХ).

Метод малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН). Эксперимент по малоугловому рассеянию нейтронов на образцах алмазной шихты проводили на спектрометре ЮМО, расположенном на 4-м канале импульсного реактора ИБР-2 (Дубна, Россия), в двух-детекторной конфигурации по методу времени пролета [16]. Поток тепловых нейтронов формировался системой коллиматоров так, что попадающие на образец нейтроны образовывали пучок 14 мм в диаметре с интенсивностью до 4×10^7 нейтронов. Диапазон по переданному импульсу q составлял $6.5 \times 10^{-3} - 0.4 \text{ \AA}^{-1}$ ($q = 4\pi \sin\theta/\lambda$, где λ – длина волны нейтрона и θ – угол рассеяния), что соответствует анализу структуры в интервале характерных размеров от 10 до 500 Å . Порошки шихты помещали в алюминиевые ячейки с углублением 1 мм. Обработку исходных экспериментальных данных проводили программой SAS [17], позволяющей проводить нормировку полученного спектра на независимый ванадиевый рассеиватель, с учетом рассеяния арматуры установки и алюминиевой ячейкой, а также фона зала [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Морфология и текстура порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором. На рис. 1 приведены СЭМ изображения для двух вариантов шихты детонационного наноалмаза, допированной бором, полученных подрывом зарядов тротила с гексогеном (рис. 1а) или тетрила (рис. 1б). Как видно из данных рисунков, порошки алмазной шихты состоят из несферических, близких к пластинчатой форме, частиц.

На рис. 2а приведены полные изотермы адсорбции–десорбции азота для порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором. Обе полученные изотермы характеризуются выраженным капиллярно-конденсационным гистерезисом и относятся к IV типу по классификации ИЮПАК (IUPAC. The International Union of Pure and Applied Chemistry Classification). Это соответствует адсорбции на мезопористых (содержащих поры диаметром 2–50 нм) материалах.

Форма петли гистерезиса, в обоих случаях, соответствует классическому типу H3, который обычно связывают с наличием щелевидных пор, характерных для материалов, состоящих из пластинчатых частиц. Тот факт, что точка смыкания адсорбционных и десорбционных ветвей полных изотерм лежит выше парциальных давлений азота $P/P_0 \approx 0.3$, свидетельствует о практически полном отсутствии микропор ($d \leq 2$ нм) в обоих порошках шихты, вне зависимости от состава использованного заряда подрыва.

Полная изотерма адсорбции–десорбции азота для порошка шихты, полученной подрывом заряда тротила с гексогеном, лежит значительно выше (во всем диапазоне парциальных давлений азота $P/P_0 = 0.01-0.99$), чем полная изотерма для порошка шихты, полученной подрывом заряда тетрила. Это явно свидетельствует о том, что при подрыве заряда тротила с гексогеном образуется шихта с существенно большими значениями удельной площади поверхности и удельного объема пор, чем при использовании тетрила в качестве заряда подрыва.

Математическая обработка полных изотерм адсорбции–десорбции азота в рамках модели БДХ позволила получить распределения пор по размерам $dV(d)$, приведенные на рис. 2б. Из данного рисунка видно, что вид распределений $dV(d)$, в первую очередь, зависит от типа используемого заряда подрыва. Так, для шихты, полученной подрывом тротила и гексогена, характерно практически нормальное распределение $dV(d)$ с максимумом $d_p \approx 9$ нм. Использование тетрила в качестве заряда подрыва привело к бимодальному распределению $dV(d)$ пор по размерам с максимумами $d_{p1} \approx 2.6$ нм и $d_{p2} \approx 11$ нм соответственно.

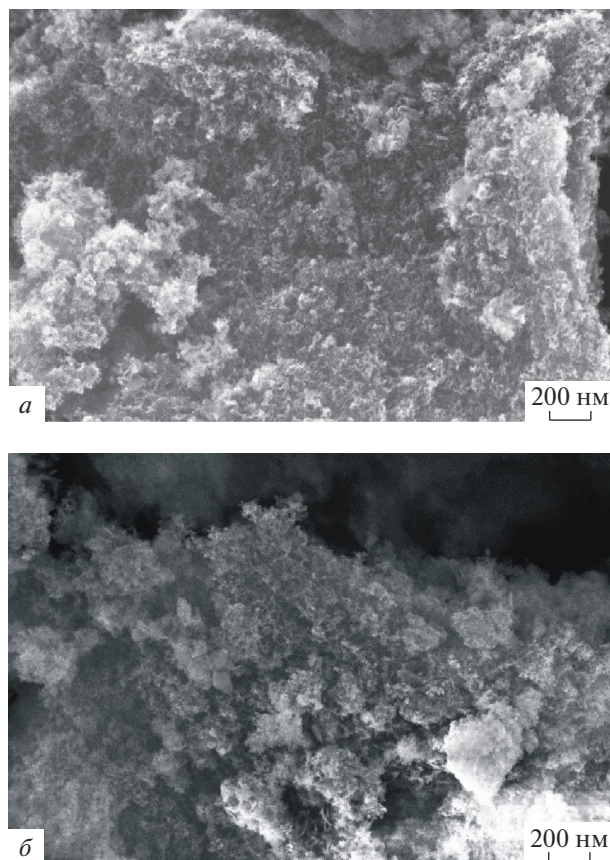


Рис. 1. Состояние поверхности порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором, полученной подрывом заряда тротила с гексогеном (*a*) и тетрила (*б*).

Результаты определения текстурных параметров двух порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором, приведены в табл. 2. Согласно полученным данным, оба порошка обладают развитой удельной поверхностью $S_{\text{БЭТ}}$ и большим удельным объемом пор $V_{\text{уд}}$. В то же время, использование в качестве заряда смеси тротила с гексогеном приводит к существенно большим, практически в 1.5 раза, значениям $S_{\text{БЭТ}}$ и $V_{\text{уд}}$, чем в случае тетрила.

Мезоструктура порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором. На рис. 3 в двойном логарифмическом масштабе представлены экспериментальные зависимости дифференциального макроскопического сечения $d\Sigma(q)/d\Omega$ МУРН для порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором, полученной подрывом зарядов тротила с гексогеном (1) или тетрила (2). Из приведенного рисунка видно, что интенсивность МУРН для порошка шихты, полученной подрывом заряда тетрила, выше, чем для образца шихты, полученной подрывом заряда тротила с гексогеном, во всем исследуемом диапазоне переданных импульсов q . Это свидетельствует о ее меньшей гомогенности по ядерной плотности на мезоскопическом масштабе (10–500 Å).

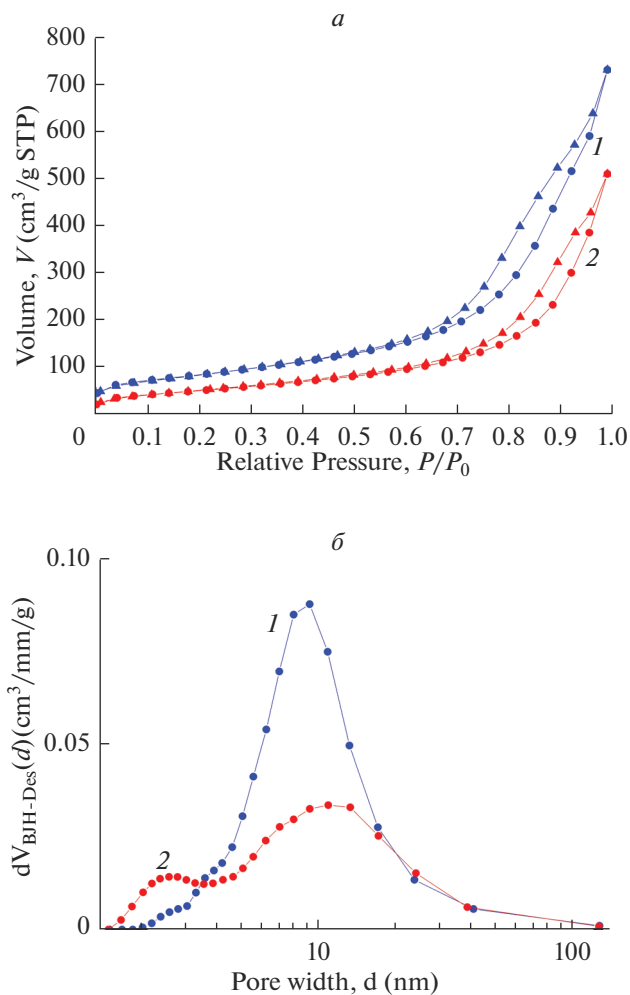


Рис. 2. Полные изотермы адсорбции–десорбции азота (*a*) и распределения пор по размерам $dV(d)$, полученные в рамках модели БДХ (*б*), для порошков шихты, полученной подрывом заряда тротила с гексогеном (1) и тетрила (2), соответственно.

В тоже время, на качественном уровне, наблюдаемая для всех порошков шихты картина малоуглового рассеяния нейтронов типична для рассеяния в пористых системах (твёрдая фаза–пора) [19–24], состоящих из случайно ориентированных несферических (анизодиаметричных) объектов, например, для сильно вытянутых или сплюснутых частиц или пор. Это явно согласуется с результатами, полученными методами растровой микроскопии и низкотемпературной адсорбции азота. В таком случае, для описания рассеяния в области Гинье, в которой оно определяется размером и формой рассеивающих неоднородностей, необходимо использовать обобщенное выражение [25]:

$$\frac{d\Sigma(q)}{d\Omega} = \frac{G}{q^s} \exp\left(-\frac{q^2 R_g^2}{3-s}\right), \quad (1)$$

Таблица 2. Текстульные параметры порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором, полученной с использованием зарядов подрыва разного состава

Характеристики	Состав заряда подрыва	
	Тротил–гексоген, 50/50	Тетрил
$S_{\text{ВЭТ}}, \text{ м}^2/\text{г}$	296 ± 6	184 ± 7
$V_P/P_0 \cong 0,995, \text{ см}^3/\text{г}$	1.14	0.80
$d_{p1} \text{ (нм) ВЈН (des)}$	–	2.6
$d_{p2} \text{ (нм) ВЈН (des)}$	9.3	11

Примечание: $S_{\text{ВЭТ}}$ – удельная поверхность, $V_{\text{уд}}$ – удельный объем пор, d_p – средний диаметр пор.

где G – коэффициент Гинье, который прямо пропорционален произведению числа неоднородностей в рассеивающем объеме и квадрату средней плотности ρ амплитуды рассеяния на них нейтронов [26], R_g – радиус гирации рассеивающих неоднородностей, параметр s определяется формой рассеивающих неоднородностей (например, для сферических объектов $s = 0$, для одномерных частиц или пор $s = 1$, для двумерных неоднородностей $s = 2$). Параметр s может принимать не только целые, но и дробные значения, в том случае, если рассеивающие неоднородности имеют, например, форму эллипсоида вращения, либо если рассеивающая система состоит из неоднородностей близких по размеру, но различной формы.

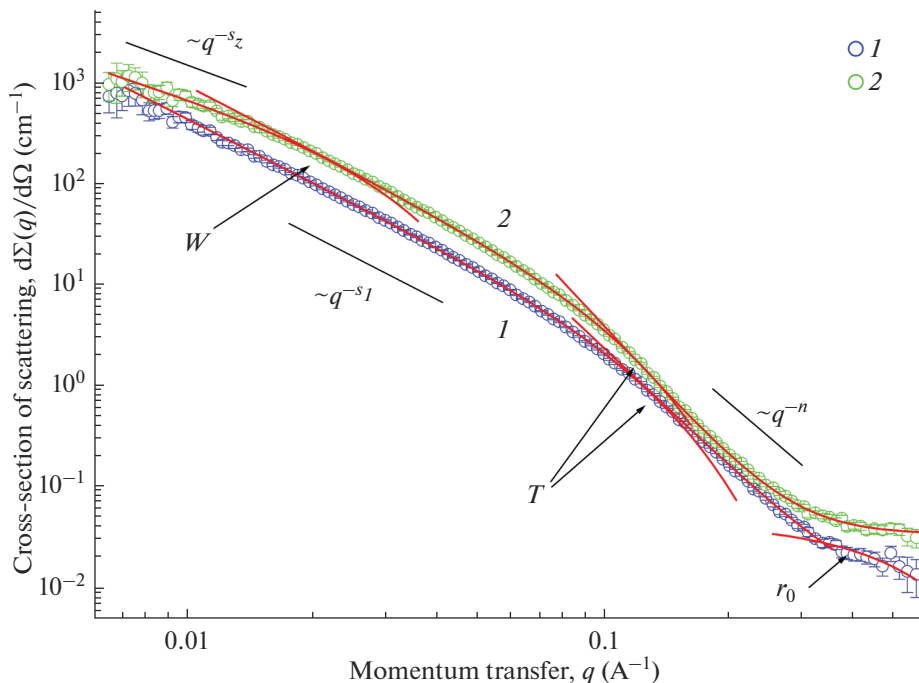


Рис. 3. Зависимости сечения малоуглового рассеяния нейтронов $d\Sigma(q)/d\Omega$ от переданного импульса q для порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором, полученной подрывом заряда тротила с гексогеном (1) и тетрила (2) соответственно. Сплошные линии – результат описания экспериментальных данных по формуле (1).

Поскольку, несферические объекты определяются не одним, а двумя (радиус R_c и длина L в случае вытянутых объектов) или тремя (толщина T , ширина W и длина L для объектов уплощенной формы) характерными размерами, то отвечающая им область Гинье может включать в себя не один, а вплоть до трех поддиапазонов по переданному импульсу q . Наличие одного (рис. 3, кривая 1) или двух (рис. 3, кривая 2) степенных участков в области Гинье свидетельствует о том, что длина L (в случае вытянутых неоднородностей) или ширина W и длина L (для неоднородностей уплощенной формы) превышают максимальный размер, который может быть определен с помощью использованной в эксперименте установки. С использованием соотношения $R_{\max} \approx 3.5/q_{\min}$ [27] можно провести оценку данного размера, который составил $R_c > 550 \text{ \AA}$.

Для исследуемых порошков шихты на зависимостях сечения рассеяния $d\Sigma(q)/d\Omega$ (рис. 3) можно выделить два диапазона по переданному импульсу q : диапазон в области больших $q > q_c$ (где q_c – точка кроссовера, то есть перехода из одного режима в другой), который отвечает за рассеяние на локальной структуре неоднородностей и описывается степенной зависимостью q^{-n} (режим Порода) и диапазон при $q < q_c$, где рассеяние определяется характерными размерами и формой рассеивающих неоднородностей (режим Гинье). В случае порошка шихты, полученной с использованием заряда тетрила, область Гинье состоит из двух поддиапазонов (рис. 3, кривая 2).

Учитывая вышесказанное, для анализа кривой 1 на рис. 3 (порошок шихты, полученной с использованием заряда из смеси тротила с гексогеном) мы использовали обобщенную эмпирическую модель Гинье–Порода с одним поддиапазоном в области Гинье [25]:

$$\frac{d\Sigma(q)}{d\Omega} = \begin{cases} \frac{G_1}{q^{s_1}} \exp\left(-\frac{q^2 R_{g1}^2}{3-s_1}\right), & q < q_c \\ \frac{B}{q^n} + I_{inc}, & q_c < q < 0.35 \text{ \AA}^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

В случае образца алмазной шихты, полученной с использованием заряда тетрила, (кривая 2 на рис. 3) в выражение (2) добавлен еще один поддиапазон в области Гинье [25]:

$$\frac{d\Sigma(q)}{d\Omega} = \begin{cases} \frac{G_2}{q^{s_2}} \exp\left(-\frac{q^2 R_{g2}^2}{3-s_2}\right), & q < q_{c_2} \\ \frac{G_1}{q^{s_1}} \exp\left(-\frac{q^2 R_{g1}^2}{3-s_1}\right), & q_{c_2} < q < q_{c_1}, (3) \\ \frac{B}{q^n}, & q_{c_1} < q \end{cases}$$

где $(3-s_1)$ и $(3-s_2)$ – размерные факторы ($s_1 > s_2$); R_{g1} и R_{g2} – характерные размеры несферических рассеивающих неоднородностей ($R_{g1} < R_{g2}$); G_2 и G_1 – коэффициенты Гинье [24]; B – коэффициент, зависящий от локальной структуры рассеивающих неоднородностей [28]; I_{inc} – некоторая, не зависящая от q , константа, обусловленная, по-видимому, некогерентным рассеянием на неоднородностях порядка используемой в эксперименте длины волны нейтронов λ . Отметим, что $R_{g1} = T/(12)^{1/2}$, $R_{g2} = (W^2/12 + T^2/12)^{1/2}$ для сплюснутых неоднородностей толщиной T и шириной W .

Следует отметить, что для порошка шихты, полученной с использованием заряда из смеси тротила с гексогеном, на кривой рассеяния в диапазоне $q > 0.35 \text{ \AA}^{-1}$ наблюдается появление так называемого “плеча”, которое свидетельствует о наличии в системе небольших сферических неоднородностей, возможно частиц несгораемых примесей,

Таблица 3. Структурные параметры порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной аморфным бором, полученные из анализа данных МУРН

Параметры	Состав заряда подрыва	
	Тротил–гексоген, 50/50	Тетрил
$G_2 \times 10^1, \text{см}^{-1} \text{Å}^{-s_2}$	–	18.4 ± 1.6
s_2	–	1.30 ± 0.06
$W = \sqrt{12R_{g_2}^2 - T}, \text{Å}$	$> 550 \text{Å}$	136.2 ± 9.5
$G_1 \times 10^2, \text{см}^{-1} \text{Å}^{-s_1}$	4.6 ± 0.3	5.5 ± 0.2
s_1	2.08 ± 0.02	2.11 ± 0.02
$T = \sqrt{12}R_{g_1}, \text{Å}$	24.9 ± 0.4	27.9 ± 0.5
$B \times 10^4, \text{см}^{-1} \text{Å}^{-n}$	2.8 ± 0.2	1.3 ± 0.1
n	3.92 ± 0.04	4.47 ± 0.04
$G_0 \times 10^1, \text{см}^{-1}$	0.56 ± 0.10	–
$r_0 = \sqrt{\frac{5}{3}}r_g, \text{Å}$	4.7 ± 0.5	–
$I_{\text{inc}}, \text{см}^{-1}$	–	0.035 ± 0.001

Примечание: G_0 , G_2 и G_1 – коэффициенты Гинье, которые прямо пропорциональны произведению числа неоднородностей в рассеивающем объеме и квадрату средней плотности ρ амплитуды рассеяния на них нейтронов [25], B – коэффициент, зависящий от локальной структуры рассеивающих неоднородностей, в данном случае от морфологии их поверхности [27], s_1 и s_2 – параметры, определяющиеся формой рассеивающих объектов, T – толщина наночастиц пластинчатой формы и W – ширина неоднородностей (пор) сплюснутой формы, n – показатель степени, r_0 – характерный размер неоднородностей сферической формы, I_{inc} – константа, обусловленная некогерентным рассеянием на неоднородностях масштаба длины волны нейтронов λ .

с характерным размером r_0 . Поведение сечения рассеяния $d\Sigma(q)/d\Omega$ в данном случае также описывается приближением Гинье (1) с параметром $s = 0$ и $r_0 = \sqrt{5/3}r_g$ [25].

Для получения окончательных результатов выражения (1), (2) и (3) сворачивали с функцией разрешения установки. Экспериментальные данные зависимости дифференциального сечения рассеяния $d\Sigma(q)/d\Omega$ обрабатывались по МНК во всем исследуемом диапазоне q . Результаты обработки представлены на рис. 3 и в табл. 3.

Из приведенных данных видно, что образцы допированной бором шихты детонационного наноалмаза, полученной подрывом зарядов тротила с гексогеном и тетрила, состоят из частиц пластинчатой формы с характерными размерами: $T \approx 25$ и 28Å и $W > 550$ и $\approx 136 \text{Å}$ соответственно. При этом, как видно из табл. 3, природа заряда, используемого для подрыва, оказывает существенное влияние на формирование локальной структуры поверхности раздела фаз (твердая фаза–пора). Так при использовании стандартной смеси тротила с гексогеном показатель степени $n = 3.92 \pm 0.04$, что соответствует рассеянию на частицах (порах), обладающих близкой к гладкой поверхностью с размерностью $D_s = 6 - n = 2.08 \pm 0.04$ [29].

В случае применения в качестве заряда тетрила, показатель степени $n = 4.47 \pm 0.04$. Это соответствует рассеянию на частицах (порах), обладающих так называемой диффузной поверхностью, для которых $n = 4 + 2\beta > 4$, где $0 \leq \beta \leq 1$ – показатель степени, характеризующий закон изменения ядерной плотности ρ в поверхностном слое неоднородностей [30]. Если предположить, что неоднородности обладают гладкой поверхностью, в таком случае ядерная плотность ρ будет зависеть лишь от расстояния x от

точки на поверхности. Таким образом, ядерная плотность $\rho(x)$ может быть представлена в виде:

$$\begin{cases} \rho(x) = 0, & x < 0 \\ \rho(x) = \rho_0 (x/\alpha)^\beta, & 0 \leq x \leq \alpha, \\ \rho(x) = \rho_0, & x \geq \alpha \end{cases} \quad (4)$$

где α – толщина диффузного слоя, в котором ядерная плотность ρ возрастает от 0 до ρ_0 . Появление такого слоя наблюдается для пористых систем (ксерогели, нанопорошки, аэрогели) [21, 24, 31, 32], в том числе после высокотемпературной обработки [33, 34].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые с использованием взаимодополняющих методов СЭМ, низкотемпературной адсорбции азота и малоуглового рассеяния нейтронов выполнен сравнительный анализ организации надмолекулярной структуры порошков допированной бором шихты детонационного наноалмаза, полученных взрывом с использованием в качестве заряда подрыва смеси тротила с гексогеном (50/50) или тетрила.

Комплексный анализ полученных данных показал, что использование в качестве заряда подрыва двух разных прекурсоров – смеси тротила с гексогеном (50/50) или тетрила позволяет получать мезопористые порошки, состоящие из случайно ориентированных несферических (анизодиаметричных) наночастиц пластинчатой формы примерно одинаковой толщины ($T \approx 25 \text{ \AA}$ – при использовании тротила и гексогена и 28 \AA – для тетрила), отличающиеся существенно меньшей шириной при использовании тетрила ($W > 550$ и $\approx 136 \text{ \AA}$ соответственно).

Установлено, что шихта, полученная из смеси тротила с гексогеном отличается в 2 раза бóльшим удельным объемом пор (1.14 vs. $0.8 \text{ см}^3/\text{г}$) и в 1.5 раза бóльшей удельной площадью поверхности (296 vs. $184 \text{ м}^2/\text{г}$).

Выявлено, что для порошка шихты, полученной из тетрила, характерны: меньшая однородность, диффузная поверхность наночастиц и бимодальное распределение пор по размерам ($d_{\text{ср.}} \sim 3$ и 11 нм), – в отличие от шихты, полученной из смеси тротила с гексогеном, для которой характерно нормальное распределение пор по размерам ($d_{\text{ср.}} \sim 9 \text{ нм}$) и более гладкая поверхность наночастиц.

Таким образом, показано, что состав зарядов подрыва оказывает существенное влияние на морфологию, текстуру и мезоструктуру порошков шихты детонационного наноалмаза, допированной бором.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 19-13-00442).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ho D. Nanodiamonds: Applications in Biology and Nanoscale Medicine, Springer US, 2010.
2. Detonation Nanodiamonds. Science and Applications. A. Vul', O. Shenderova (Ed.). 1st Ed. N.Y., Jenny Stanford Publishing, 2014.
3. Shenderova O.A., McGuire G.E. Science and engineering of nanodiamond particle surfaces for biological applications // Biointerphases. 2015. V. 10. P. 030802.
4. Passeri D., Rinaldi F., Ingallina C., Carafata M., Rossi M., Terranova M.L., Marianecchi C. Biomedical applications of nanodiamonds: an overview // J. Nanosci. Nanotechnol. 2015. V. 15. № 2. P. 972–988.
5. Szunerits S., Barras A., Boukherroub R. Antibacterial applications of nanodiamonds // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2016. V. 13. № 4. P. 413.
6. Solarska-Ściuk K., Kleszczy-Ska H. Possibilities of nanodiamonds application—biological and medical aspects // Acta Pol. Pharm. Drug Res. 2019. V. 76. № 5. P. 779–796.

7. *Gutiérrez J.M.B., Conceição Katia, Andrade Vitor Martinsde, Trava-Airoldi V.J., Capote G.* High antibacterial properties of DLC film doped with nanodiamond // *Surf. and Coat. Techn.* 2019. V. 375. P. 395–401.
8. *Norouzi N., Ong Y., Damle V.G., Najafi M.B.H., Schirhagl R.* Effect of medium and aggregation on antibacterial activity of nanodiamonds // *Mater. Sci. Eng. C.* 2020. V. 112. P. 110930.
9. *Berdichevskiy G.M., Vasina L.V., Ageev S.V., Meshcheriakov A.A., Galkin M.A., Ishmukhametov R.R., Nashchekin A.V., Kirilenko D.A., Petrov A.V., Martynova S.D., Semenov K.N., Sharoyko V.V.* A Comprehensive Study of Biocompatibility of Detonation Nanodiamonds // *J. Molec. Liq.* 2021. V. 332. P. 115763.
10. *Dolmatov V.Yu., Ozerin A.N., Kulakova I.I., Bochechka O.O., Lapchuk N.M., Myllymäki V., Vehanen A.* Detonation nanodiamonds: new aspects in the theory and practice of synthesis, properties and applications // *Russ. Chem. Rev.* 2020. V. 89. № 12. P. 1428–1462.
11. *Khamova T.V., Shilova O.A., Vlasov D.Y., Ryabusheva Y.V., Frank-Kamenetskaya O.V., Marugin A.M., Mikhail'chuk V.M., Ivanov V.K., Dolmatov V.Yu.* Bioactive coatings based on nanodiamond-modified epoxy siloxane sols for stone materials // *Inorg. Mater.* 2012. V. 48. № 7. P. 702–708.
12. *Shevchenko V.Y., Perevislov S.N.* Reaction–Diffusion mechanism of synthesis in the diamond–silicon carbide system // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. P. 1107–1114.
13. *Soboleva O.A., Porodenko E.V., Sergeev V.G.* Oxidized nanodiamond batches as filler for composite films based on polyvinyl alcohol // *Russ. J. Gen. Chem.* 2017. V. 87. P. 1584–1590.
14. *Shilova O., Dolmatov V., Panova G., Khamova T., Baranchikov A., Gorshkova Yu., Udalova O., Zhuravleva A., Kopitsa G.* Nanodiamond batch enriched with boron: Properties and prospects for use in agriculture // *Biointerface Res. Appl. Chem.* (in press).
15. *Плышевский Ю.С., Херхер Т.Е., Кнышев Е.А., Липинский И.Е., Виноградов А.А.* Способ получения аморфного бора. Свидетельство об изобретении № 831727SU/ № 2716750, приоритет: 1979.01.25; подано: 1981.05.23.
16. *Kuklin A.I., Islamov A.Kh., Gordeliy V.I.* Scientific Reviews: Two-detector system for small-angle neutron scattering instrument // *Neutron News.* 2006. V. 16. № 3. P. 16–18.
17. *Soloviev A.G., Solovieva T.M., Kuklin A.I.* SAS – Package for Small-Angle Neutron Scattering Data Treatment. Program Library JINRLIB. Joint Institute for Nuclear Research. <http://wwwinfo.jinr.ru/programs/jinrlib/sas/indexe.html> – Date of access: 21.06.2021.
18. *Ostanevich Yu.M.* Time-of-flight small-angle scattering spectrometers on pulsed neutron sources // *Makromol. Chem. Macromol. Symp.* 1988. V. 15. № 1. P. 91–103.
19. *Glatter O., Kratky O.* *Small-Angle X-ray Scattering*, London: Academic Press, 1982.
20. *Roe R.J.* *Methods of X-ray and Neutron Scattering in Polymer Science*. N.Y.: Oxford University Press, 2000.
21. *Khodan A.N., Kopitsa G.P., Yorov Kh.E., Baranchikov A.E., Ivanov V.K., Feoktistov A., Pipich V.* Structural analysis of aluminum oxyhydroxide aerogel by small angle scattering // *J. Surf. Investig. X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2018. V. 12. № 2. P. 296–305.
22. *Yorov K.E., Shekunova T.O., Baranchikov A.E., Kopitsa G.P., Almásy L., Skogareva L.S., Kozik V.V., Malkova A.N., Lermontov S.A., Ivanov V.K.* First rare-earth phosphate aerogel: sol-gel synthesis of monolithic ceric hydrogen phosphate aerogel // *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 2018. V. 85. № 3. P. 574–584.
23. *Ivanova L.A., Ustinovich K.B., Khamova T.V., Eneyskaya E.V., Gorshkova Y.E., Tsvigun N.V., Burdakov V.S., Verlov N.A., Zinovev E.V., Asadulaev M.S., Shabunin A.S., Fedyk A.M., Baranchikov A.Ye., Kopitsa G.P., Kulminskaya A.A.* Crystal and supramolecular structure of bacterial cellulose hydrolyzed by cellobiohydrolase from *scytalidium candidum* 3C: A basis for development of biodegradable wound dressings // *Materials.* 2020. V. 13. № 9. P. 2087.
24. *Baranchikov A.E., Kopitsa G.P., Yorov Kh.E., Sipyagina N.A., Lermontov S.A., Pavlova A.A., Kottsov S.Yu., Garamus V.M., Ryukhtin V., Ivanov V.K.* SiO₂–TiO₂ Binary Aerogels: A Small-Angle Scattering Study // *Rus. J. Inorg. Chem.* 2021. V. 66. P. 874–882.
25. *Hammouda B.* A New Guinier-Porod Model // *J. Appl. Crystallogr.* 2010. V. 43. P. 716–719.
26. *Guinier A., Fournet G.* *Small-Angle Scattering of X-Rays*. N.Y., John Wiley & Sons, Inc., 1955.
27. *Bale H.D., Schmidt P.W.* Small-angle X-ray-scattering investigation of submicroscopic porosity with fractal properties // *Phys. Rev. Lett.* 1984. V. 38. P. 596–599.
28. *Schmidt P.W.* Some fundamental concepts and techniques useful in small-angle scattering studies of disordered solids. In: *Modern Aspects of Small-Angle Scattering* / H. Brumberger (Ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.
29. *Teixeira J.* Experimental methods for studying fractal aggregates, in: *Growth Form*, Springer Netherlands, Dordrecht. 1986. P. 145–162.
30. *Schmidt P.W., Avnir D., Levy D., Höhr A., Steiner M., Röhl A.* Small-angle X-ray scattering from the surfaces of reversed-phase silicas: Power-law scattering exponents of magnitudes greater than four // *J. Chem. Phys.* 1991. V. 94. № 2. P. 1474–1479.
31. *Chuvashova I.G., Vanetsev A.S., Gaitko O.M., Kopitsa G.P., Garamus V.M., Orlovskii Yu.V., Tretyakov Yu.D.* Effect of Synthesis Conditions of the Micro- and Mesostructure of Monodisperse Y(OH)CO₃ Powders // *Doklady Chemistry.* 2012. V. 446. Part 2. P. 207–211.

32. *Gubanova N.N., Baranchikov A.Ye., Kopitsa G.P., Almásy L., Angelov B., Yapyntsev A.D., Rosta L., Ivanov V.K.* Combined SANS and SAXS study of the action of ultrasound on the structure of amorphous zirconia gels // *Ultrasonic Sonochem.* 2015. V. 24. P. 230–237.
33. *Ivanov V.K., Kopitsa G.P., Baranchikov A.Ye., Sharp M., Pranzas K., Grigoriev S.V.* Mesostructure, Fractal Properties and Thermal Decomposition of Hydrous Zirconia and Hafnia // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2009. V. 54. № 14. P. 2091–2106.
34. *Putz A.M., Wang K., Len A., Plocek J., Bezdicka P., Kopitsa G.P., Khamova T.V., Ianăși C., Săcărescu L., Mitróová S., Savii C., Yan M., Almásy L.* Mesoporous silica obtained with methyltriethoxysilane as co-precursor in alkaline medium. Mesoporous silica obtained with methyltriethoxysilane as co-precursor in alkaline medium // *App. Surf. Sci.* 2017. V. 424. Part 3. P. 275–281.