

Согласно табл. 2, вклад в суммарную долю выхода ЗН составляет 88 % от 0,005972.

### Заключение

Благодаря новой графической зависимости (рис. 1), полученной с помощью актуализации расчета суммарной доли ЗН, можно точнее: оценивать зависимость периода реактора от реактивности и наоборот, определять величину перемещения стержней управления и защиты, и т. д. Это позволит точнее и безопаснее управлять ядерным реактором, что в свою очередь позволит увеличить период его эксплуатации. Также была составлена уточненная таблица, которая повышает точность расчёта по стандартному шестигрупповому приближению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мерзликин Г.Я. Основы теории реакторов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2015. – 452 с.
2. Japan Atomic Energy Agency, Nuclear Data and Reactor Engineering Division, Nuclear Data Center. – Japan, 2023. – URL: <https://www.ndc.jaea.go.jp>. (дата обращения 28.10.2023).
3. IAEA Nuclear Data Section – Reference Database for Beta-Delayed Neutron Emission Data. – USA, 2022. – URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/delayedn/delayedn.html>. (дата обращения 28.10.2023).
4. Н. Böck, М. Villa. Physics and Kinetics of Triga Reactor, Atomic Institute of the Austrian Universities, 2007. – 36 с.
5. Impact of delayed neutron constants on reactivity effects measured in a fast reactor / A. Krása et al. – Belgian Nuclear Research Centre, 2019. – 9 с.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА БОРА

**А.А. Кузнецова<sup>1</sup>, Ю.З. Васильева<sup>2</sup>, П.В. Поваляев<sup>3</sup>**

*Томский политехнический университет,  
ЛПМЭО ИШЭ ТПУ, инженер<sup>1</sup>; научный сотрудник<sup>2</sup>; младший научный сотрудник<sup>3</sup>*

Научный руководитель: А.Я. Пак, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Карбид бора является уникальным материалом, характеризующимся высокой твердостью, высокой температурой плавления (более 2500 °С), низкой плотностью (около 2,5 г/см<sup>3</sup>), термостабильностью, хорошими электрическими и ядерными характеристиками [1]. Вышеперечисленные свойства позволяют использовать карбид бора для производства сверхтвердой керамики, износостойких покрытий, абразивных порошков, а также поглотителя нейтронного излучения [2–4].

Основным методом получения карбида бора является карботермическое восстановление из оксида бора. Синтез карбида бора проводится в среде инертного газа в течение нескольких часов при температуре 1500–2300 °С [5]. Также для синтеза карбида бора используется самораспространяющийся высокотемпературный синтез, механический синтез в шаровых мельницах путем размолла исходных материалов в течение длительного времени, плазменное распыление, кристаллизация из расплава [6]. Данные методы характеризуются низкой производительностью, высокими энергетическими затратами на получение карбида бора, что вносит существенный вклад в стоимость получаемого продукта.

Перспективным для синтеза карбида бора является использование электродугового плазменного метода. Такой метод обеспечивает высокие скорости нагрева и позволяет достичь

высоких температур в широком диапазоне [7]. Применение безвакуумного электродугового плазменного синтеза позволяет существенно упростить и удешевить используемое оборудование. Реализация процесса синтеза в открытой воздушной среде позволит значительно повысить энергоэффективность получения карбида бора ввиду отсутствия необходимости получения и поддержания требуемой степени вакуума [8].

В работе были проведены экспериментальные исследования по получению карбида бора энергоэффективным плазменным методом в открытой воздушной среде. Полученный материал был исследован методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с использованием микроскопа марки JEOL JEM-2100F.

На рис. 1 представлены результаты просвечивающей электронной микроскопии карбида бора. Установлено, что основная доля частиц имеет размер от 200 нм до 500 нм, частицы имеют неправильную форму с характерной огранкой (рис. 1, а, б). По результатам ПЭМ определены межплоскостные расстояния из картины дифракции электронов (рис. 1, в): 4,49 Å, 2,59 Å, 1,71 Å, 1,65 Å, 1,44 Å, 1,26 Å, которые в пределах допустимых погрешностей соответствуют эталонным межплоскостным расстояниям фазы карбида бора  $B_4C$  (карточка № 35-798, PDF4+), и межплоскостное расстояние 1,52 Å, которое в пределах допустимых погрешностей соответствует эталонному межплоскостному расстоянию фазы карбида бора  $B_{13}C_2$  (карточка № 71-108, PDF4+).

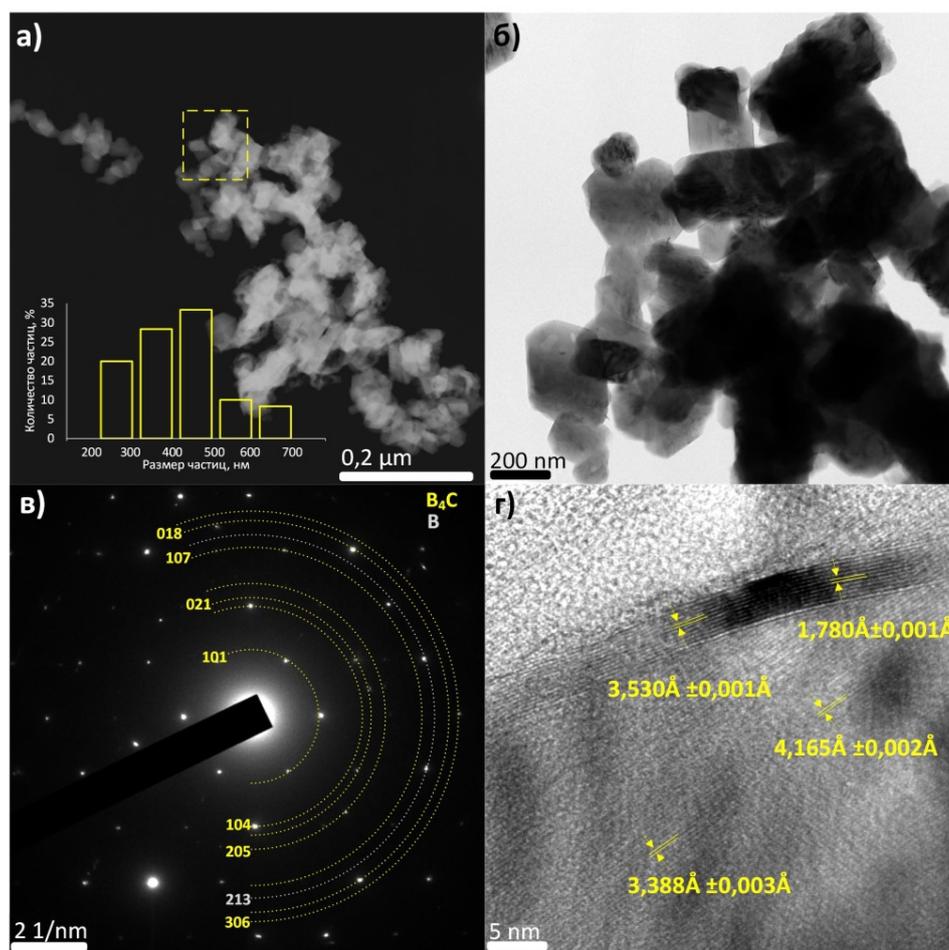


Рис. 1. Результаты просвечивающей электронной микроскопии карбида бора:  
а – темнопольный снимок скопления частиц, б – светлопольный снимок скопления частиц,  
в – соответствующая картина дифракции электронов,  
г – снимок в режиме прямого разрешения

По ПЭМ-снимкам определено, что структура некоторых частиц представляет собой тип «ядро-оболочка» с оболочкой, состоящей из атомных слоёв с межплоскостным расстоянием  $3,530 \pm 0,001 \text{ \AA}$  и  $3,592 \pm 0,072 \text{ \AA}$ , что соответствует структуре графита. В ядре этих частиц идентифицированы межплоскостные расстояния равные  $3,960 \pm 0,040 \text{ \AA}$  и  $3,935 \pm 0,075 \text{ \AA}$ , что соответствует структуре карбида бора  $B_4C$  (карточка № 35-798, PDF4+) (рис. 1, з).

На основании представленных данных можно сделать вывод о возможности реализации процесса синтеза порошка карбида бора безвакуумным электродуговым плазменным методом, обладающим повышенными показателями энергоэффективности в сравнении с прямыми аналогами. Частицы полученного карбида бора являются наноразмерными со структурой «ядро-оболочка» и средним размером 400 нм.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2023-0011).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Р.А. Микро- и наноразмерный карбид бора: синтез, структура и свойства // Успехи химии. – 2012. – Т. 81. – №. 6. – С. 549–559.
2. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress / V. Domnich, S. Reynaud, R.A. Haber, M. Chhowalla // Journal of the American Ceramic Society. – 2011. – Vol. 94, № 11. – P. 3605–3628.
3. Thermoelectric properties of boron-carbide thin film and thin film based thermoelectric device fabricated by intense-pulsed ion beam evaporation / S. Sasaki, M. Takeda, K. Yokoyama, T. Miura, T. Suzuki, H. Suematsu, W. Jiang, K. Yatsui // Science and Technology of Advanced Materials. – 2005. – Vol. 6, № 2. – P. 181.
4. Ballistic impact damage observations in a hot-pressed boron carbide / J. C. LaSalvia, R.B. Leavy, J.R. Houskamp, H.T. Miller, D.E. MacKenzie, J. Campbell // Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 2009. – Vol. 30, № 5. – P. 45.
5. Boron carbide – A comprehensive review / F Thevenot // Journal of the European Ceramic Society – 1990. – Vol. 6, № 4. – P. 205.
6. Synthesis of low carbon boron carbide powder using a minimal time processing route / A. Mishra, R.K. Sahoo, S.K. Singh, B.K. Mishra // Journal of Asian Ceramic Societies. – 2015. – Vol. 3, №. 4. – P. 373–376.
7. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge / A.Ya. Pak, I.I. Shanenkov, G.Y. Mamontov, A.I. Kokorina // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2020. – 105343.
8. Синтез порошка карбида бора безвакуумным электродуговым методом и получение объемной керамики методом искрового плазменного спекания / Р.С. Мартынов и др. // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 65–76.

## БЕЗВАКУУМНЫЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СИНТЕЗ И ЕГО ЭНЕРГОЕМКОСТЬ В СРАВНЕНИИ С СИНТЕЗОМ В ВАКУУМНОЙ ПЕЧИ

**А.И. Кокорина, А.А. Свинухова, А.Д. Мисюкова, П.В. Поваляев**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ЛПМЭО*

Научный руководитель: А. Я. Пак, д.т.н., заведующий ЛПМЭО ИШЭ ТПУ

Карбид вольфрама  $WC$  характеризуется высокой температурой плавления, высокими твердостью и износостойкостью, высокими электро- и теплопроводностью и применяется в сферах обрабатывающей промышленности, бурения горных пород, изготовления режущих инструментов и штампов, а также в качестве носителя катализатора в реакциях получения водорода [1–2]. В качестве решения проблемы развития методов получения карбида воль-