

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-

фрама предлагается безвакуумный электродуговой синтез, который возможно реализовать без применения вакуумного оборудования в силу образования угарного и углекислого газов, которые экранируют реакционный объем от кислорода воздуха [3]. Данный метод отличается простотой и возможностью быстрого достижения высоких температур. Также широко распространен синтез карбида вольфрама методом цементации в вакуумной печи [4–5]. Так, в работе [5] за 6 часов при температуре 1150 °С в результате карботермической реакции получили 200 г карбида вольфрама WC.

Установка представляет собой трехфазный электродуговой реактор (рис. 1), модуль питания которого включает в себя три источника постоянного тока.

Их выводы подключены к электрододержателям, необходимым для установки графитовых стержней (анодов) и тиглей (катод). Под катодом подразумевается система из двух графитовых тиглей: внешнего (высота 55 мм и внешний диаметр 50 мм) и внутреннего (высота 20 мм и внешний диаметр 30 мм). Внутренние стенки внешнего тигля оборачивали графитовым войлоком, а во внутренний тигель засыпали 30 г исходной смеси (порошок вольфрама и углерода в соотношении 15,31:1). Также внутренний тигель закрывали графитовой крышкой, чтобы минимизировать возможность попадания примесей. Синтез длился в течение 120 с. В процессе синтеза ток и напряжение дугового разряда записывались на осциллограф. По данным осциллографа была определена энергия, введенная в систему в процессе синтеза, равная 0,3 кВт·ч. С учетом массы загрузки, получаем энергоемкость процесса, равную 0,01 кВт·ч/г. После синтеза был проведен рентгенофазовый анализ (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD 7000 s). Было установлено, что продукт синтеза содержит 72,6 вес. % WC и 27,4 вес. % W<sub>2</sub>C (рис. 2).

Для сравнения была взята горизонтальная вакуумная печь ПЭС 2100В. Общая мощность печи, включая главный блок, вакуумный блок, блок управления и чиллер – 120 кВт. Из них 100 кВт – мощность нагревателей. На основе литературных данных возьмем скорость нагрева 5 °С/мин, температуру синтеза 1150 °С и время 6 ч. С учетом нагрева, процесс синтеза длится 9,83 ч. Таким образом, в процессе синтеза была потрачена энергия, равная 983 кВт·ч. Масса загрузки составила 200 г. Таким образом, энергоемкость составила 4,915 кВт·ч/г.

Таким образом, подтверждено, что безвакуумный электродуговой синтез характеризуется меньшими электрозатратами, чем процесс карботермической реакции в вакуумной печи. Также стоит учесть, что процесс безвакуумного электродугового синтеза занимает гораздо меньше времени, особенно с учетом отсутствия необходимости организации вакуума.

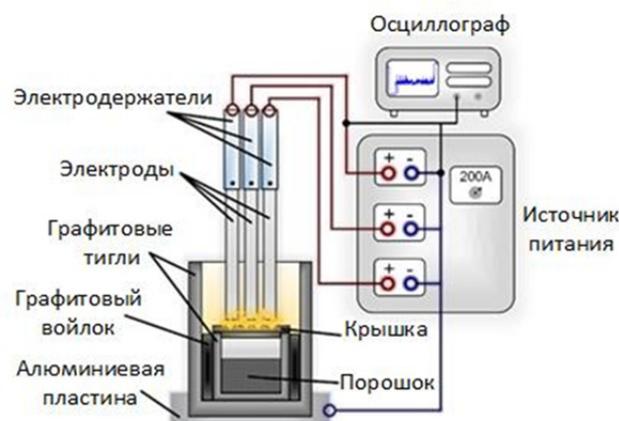


Рис. 1. Принципиальная схема трехфазного электродугового реактора постоянного тока

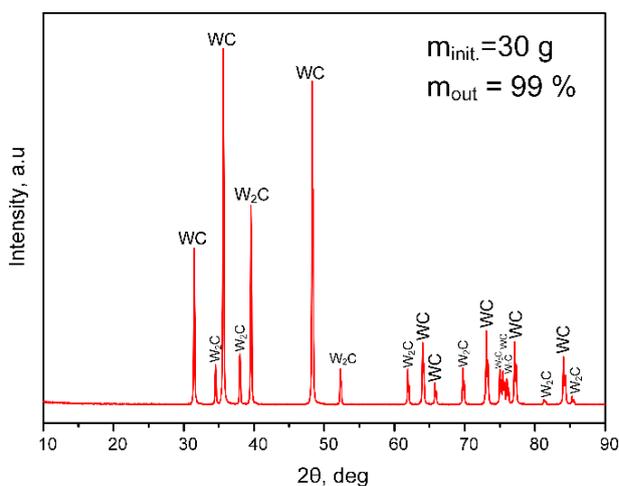


Рис. 2. Картина рентгеновской дифракции полученного образца

*Работа выполнена при поддержке программы Государственного задания вузам (проект № FSWW-2022-0018).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tripathy H. High temperature thermophysical properties of spark plasma sintered tungsten carbide // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2022. – V. 104. – № 105804.
2. Uhlmann E. Application of Additive Manufactured Tungsten Carbide Tool Electrodes in EDM // Procedia CIRP. – 2018. – V. 68 – P. 86–90.
3. Pak A.Y. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials – 2020. – V. 93. – № 105343.
4. Medeiros F. F. P. Synthesis of tungsten carbide through gas–solid reaction at low temperatures // Materials Science and Engineering A315. – 2001. – P. 58–62.
5. Polini R. Toward Greener Synthesis of WC Powders for Cemented Tungsten Carbides Manufacturing // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2021. – Vol. 9. – P. 8458–8466.

## ПОЛУЧЕНИЕ ВОДОРОДА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

**А.А. Суховеев**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ 5AM23*

Научный руководитель: Ю. Л. Шаненкова к.т.н., доцент НИ ТПУ

Карбид кремния представляет интерес, поскольку обладает высокой температурой плавления, твёрдостью, износостойкостью, а также химической стойкостью. Все эти свойства позволяют применять материалы из карбида кремния в различных сферах деятельности и используется в различных областях производства, от абразивных материалов, износостойкой и жаростойкой керамики до радиационно-стойких композитов, также представляют интерес наноструктуры на основе SiC, которые потенциально могут проявлять высокий эффект в катализе. При всем обилии разнообразных техник для синтеза нанокарбида кремния, существует проблема полноценного использования уникальной совокупности физических характеристик SiC вследствие сложности получения качественных наноструктур, загрязнений и грубой дисперсности получаемого продукта, энергозатратности и многостадийности используемых методик. В связи с этим фундаментальной научной задачей является разработка новой методики получения наноструктур карбида кремния, пригодных для использования в качестве катализаторов.

В данной работе предлагается осуществлять синтез композитного материала на основе наноструктурированного карбида кремния путем переработки отходов сельскохозяйственной продукции – РШ, ШО, СО. Предварительно осуществлялась карбонизация исходной биомассы. Полученные биочары обрабатывались в высокоскоростной струе плазмы дугового разряда. Конечный синтезированный композитный материал исследовался в качестве катализатора и сокатализатора платины в реакции выделения водорода (HER).

Преимущество подхода заключается в экологичности, поскольку биомасса содержит углерод и зачастую кремнезем, обеспечивая почти идеальный исходный материал для синтеза кристаллов карбида кремния. При этом также решается задача утилизации отходов, т. к. ежегодно в мире производится миллионы тонн.