

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Вознесенская Д.Д. Сравнительная экономическая оценка комплекса мероприятий по обращению с радиационно-загрязненным графитом при выводе АЭС из эксплуатации // Неделя науки СПбПУ, 2019 г. – 762 с.
2. Былкин Б.К., Енговатов И.А. Вывод из эксплуатации реакторных установок / Б.К. Былкин, И.А. Енговатов. – М-во образования и науки Росс. Федерации, Моск. гос. строит. ун-т. Москва: МГСУ, 2014. 228 с.
3. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. — Под общей редакцией Е.В. Евстратова, А.М. Агапова, Н.П. Лаверова, Л.А. Большова, И.И. Линге. — 2012 г. — 356 с. — Т1.
4. "Росатом" объяснил важность для экологии проекта по урану с Францией (электронный ресурс) // РИА Новости 13.10.2021. URL: <https://ria.ru/20211013/rosatom-1754417339.html> [Дата обращения 15.11.2021]
5. Handbook of advanced radioactive waste conditioning technologies ed Michael I. Ojovan (Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing), 2010 г. – 488 с., ил.
6. Hee-Chul Yang, Joon-Hyung Kim. Characteristics of dioxins and metals emission from radwaste plasma arc melter system. Chemosphere 57 (2004) 421 – 428.

Научный руководитель: В.Е. Губин, к.т.н., доцент, НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## СИНТЕЗ КАРБИДА ТИТАНА ИЗ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ МЕТОДОМ

А.А. Гумовская<sup>1</sup>, А.Я. Пак<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет<sup>1,2</sup>  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ11<sup>1</sup>  
ИШЭ, НИЦ «Экоэнергетика 4.0»<sup>2</sup>

Ультратугоплавкие материалы являются основой сырьевой базы акосмической отрасли и ряда технологий металлургической отрасли [1]. В частности, карбид титана (TiC) известен благодаря своим ценным свойствам: высокая температура плавления, относительно низкая плотность, высокая твердость, хорошая износостойкость [2]. В последние несколько лет также рассматриваются возможности использования карбидов титана в накопителях электрической энергии сверхвысокой емкости. Обычно для синтеза карбида титана используется технически чистый титан или оксид титана, а также углерод различного происхождения. В качестве источника углерода может быть использован древесный уголь. Древесный уголь сочетает в себе высокую прочность, жёсткость и вязкость при низкой плотности, благодаря его уникальной микроструктуре [3]. Кроме того, древесина, как и любая биомасса, является потенциально возобновляемым

ресурсом для производства карбидов [4]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований, в ходе которых показана возможность синтеза карбида титана в плазме дугового разряда с использованием в качестве исходного сырья древесных опилок, т.е. отходов деревообрабатывающего предприятия.

В качестве источника углерода был взят древесный уголь, полученный с помощью процесса пиролиза измельченной древесины, а именно сосны (ООО Дзержинский ЛПК г. Томск). Суть процесса пиролиза заключается в необратимом химическом изменении древесных отходов под действием температуры без доступа кислорода. Паровой пиролиз проводился при температуре 400 °С в течение 1 часа.

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальном лабораторном электродуговом стенде [5]. Основные элементы стенда – графитовые электроды, подключенные к источнику питания. Катод выполнен полым, в него засыпается смесь порошков титана или диоксида титана и углерода, которые предварительно были перемолоты и смешаны. На анод и катод подается разность потенциалов, и в разрядном промежутке в полости катода формируется разряд. Под действием дугового разряда (при силе тока до 200 А, напряжении на разряде до 35 В) в системе поднимается температура, и происходит синтез карбида титана. Полученные материалы анализируются методом рентгеновской дифрактометрии (Shimadzu XRD 7000s, длина волны излучения 1,54060 Å), а также методом растровой электронной микроскопии (Hitachi TM3000, Tescan Vega 3 SBU).

На рисунке 1 представлены микрофотографии исходных древесных опилок после операции пиролиза, используемые в качестве исходного сырья. Видны характерные каналы и капилляры в структуре частиц. Размеры полученных частиц составляют приблизительно от 100 мкм до 500 мкм.

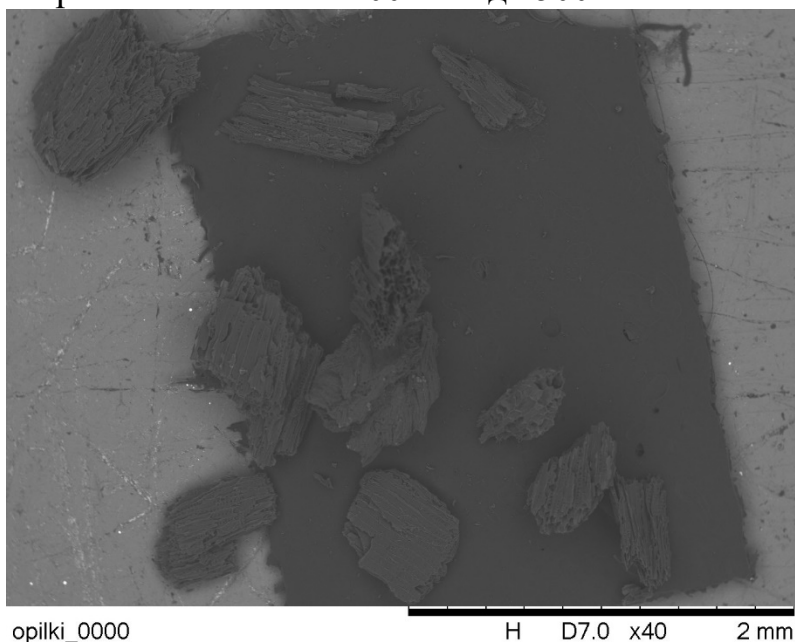


Рис. 1. Типичные результаты растровой электронной микроскопии продукта электродугового синтеза в системе с титаном и углеродом  
На рисунке 2 изображена типичная картина рентгеновской дифракции.

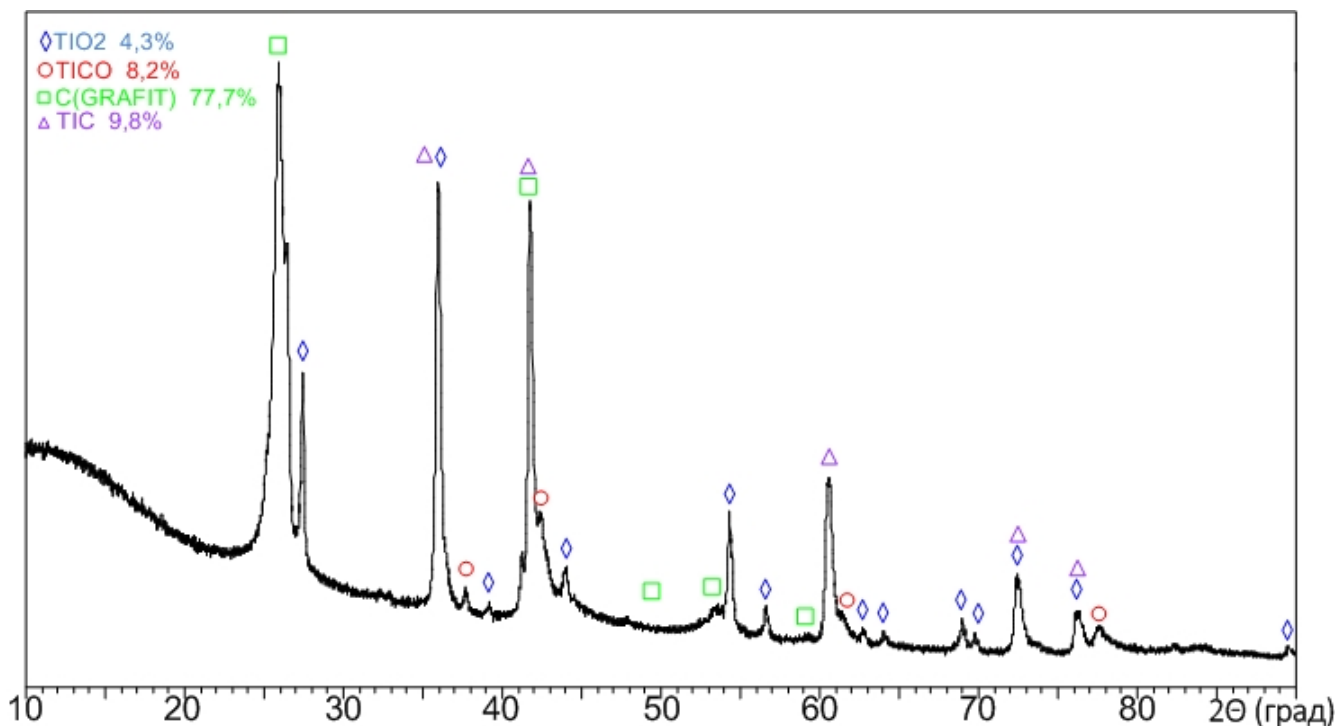


Рис. 2. Типичная картина рентгеновской дифракции продуктов электродугового синтеза.

По положениям дифракционных максимумов определено присутствие трех основных кристаллических фаз: графит С, оксид титана  $TiO_2$  (рутил), кубический карбид титана  $TiC$ . Оксид титана является остатками непрореагировавшего исходного сырья. Фаза графита сформировалась из исходного рентгеноаморфного углерода под действием высоких температур плазмы дугового разряда постоянного тока. Карбид титана сформировался в результате взаимодействия углерода и диоксида титана с выделением углекислого газа и в соответствии с известной диаграммой состояний «титан-углерод».

По совокупности представленных данных можно сделать вывод о пригодности использования древесного угля в процессах получения кристаллических фаз карбидов титана электродуговым методом. В дальнейших исследованиях требуется установление зависимостей для управления фазовым составом продукта, а также еще предстоит определить возможность получения особого морфологического типа карбида титана, представляющего собой микроструктуру схожую со строением древесины, т.е. так называемого биоморфного карбида титана.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (Грант № 21-79-10030).

Благодарности: Работа выполнена при поддержке программы Государственного задания ВУЗам (проект № FSWW-2020-0022) в части получения древесного угля.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Li F. Porous ultra-high temperature ceramics: preparation, Structure and properties // Chin. Ceram. Soc. – 2018 N 46 C. 1669-1684.
2. Pierson HO. Handbook of refractory carbides and nitrides. - Westwood and New Jersey: Noyes Publications, 1996.
3. MinYu. Wood-derived ultra-high temperature carbides and their composites: A review Author links open overlay panel. // Ceramics International – 2020. V 46, N 5, C. 5536-5547.
4. M. Luo. Biomorphic TiN/C ceramics prepared by reduction–nitridation of charcoal/titania composite. // Mater. Sci. – 2007. V 42. N 11. C. 3761-37661.
5. Pak A. Ya., Grinchuk P. S., Mamontov G. Ya., Yakich T. Yu., and Gumovskaya A. A. Production of HfTaTiNbZrC5 high-entropy carbide micropowder in the plasma of an atmospheric pressure arc discharge // Eng. Phys. & Thermophys – 2021.- V 94, N 1.

Научный руководитель: А.Я. Пак, к.т.н., научный сотрудник НИЦ «Эко-энергетика 4.0» ИШЭ ТПУ.

## **МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОНОВКИ МОРСКИХ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Д.Ю. Давыдов

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ

Приоритетным направлением развития ветроэнергетики может стать построение морских ветроэлектростанций (МВЭС) в шельфовых зонах акваторий морей северных регионов России, применение которых позволит обеспечить 30-50% снижение потребностей в органическом топливе [1]. Сдерживающим фактором является большая капиталоемкость подобных проектов и, как следствие, высокий показатель нормированной себестоимости электроэнергии (LCOE). Следовательно, для обеспечения рентабельности необходимо достижение высокой производительности МВЭС при минимуме экономических затрат на ее сооружение (CAPEX). Для достижения общей высокой эффективности МВЭС требуется решение комплексной задачи оптимизации компоновки, включающей в себя выбор схемы размещения ветроустановок (ВЭУ) и проектирование электрической системы. Высокая сложность решения поставленной задачи обусловлена большим разнообразием состава и типов оборудования МВЭС, множеством технических ограничений, что вызывает необходимость разработки эффективных средств оптимизации, позволяющих выполнять сравнение множества различных вариантов построения МВЭС за адекватное время.

Взаимосвязи между задачами оптимизации расстановки ВЭУ и оптимизации электрической системы, а также факторы и ограничения показаны на рисунке 1.