

Рис. 1. Схема получения функционального материала ПЭТ@UiO-66-I

пористость оценивали с помощью метода Брунауэра Эммета Теллера. Благодаря способности к невалентному (ХВ) органическим галагенидам удалось добиться наибольшей эффективности удаления галогенсодержащих загрязнителей из воды. Также ХВ позволило добиться селективного разделения водных растворов

хлорбензолов и толуола. С использованием Рамановской, ультрафиолетовой и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии было доказано образование ХВ между йод-содержащим MOF на поверхности PET и галогенсодержащими загрязнителями.

### Список литературы

1. Evangeliou N. // *Nat. Commun*, 2020. – Vol. 11. – № 1. – P. 356–371.
2. Amaral-Zettler L. // *Nat. Rev. Microbiol.*, 2020. – Vol. 18. – № 4. – P. 139–151.
3. Feng M. // *Chemosphere*, 2018. – Vol. 209. – № 2. – P. 783–800.
4. Hendon C. // *ACS Cent. Sci.*, 2017. – Vol. 3. – P. 554–563.
5. Yuanzhe T. // *J. Mater. Chem. A*, 2019. – Vol. 7. – P. 18324–18329.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МОРФОЛОГИИ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО КАРБИДА $HfTaTiNbZrC_5$

А. А. Гумовская

Научный руководитель – к.т.н., н.с. А. Я. Пак

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет  
aag109@tpu.ru

Высокоэнтропийные карбиды (High entropy carbide – HEC) представляют относительно недавно открытый класс материалов, используемых в условиях, где рабочие температуры могут превышать  $3000\text{ }^\circ\text{C}$  [1]. В состав HEC входят несколько переходных металлов IV–V групп

(реже VI группы) и углерод. В кристаллической решетке карбида образуются сильные ковалентные связи, благодаря чему данные материалы обладают выдающимися свойствами, такими, как высокая температура плавления, высокая твердость, высокая электро- и теплопроводность [2].

Карбиды отдельных переходных металлов IV–V групп являются ультратугоплавкими сверхтвёрдыми материалами, в этой связи формирование многокомпонентного НЕС из металлов IV–V может позволить получить новые результаты в области синтеза и исследования свойств материалов для экстремальных условий.

Одним из основных методов получения НЕС является метод искрового плазменного спекания [3]. Для осуществления синтеза высокоэнтропийных карбидов данным методом необходимы высокие температуры более 2000 °С, давление более 50 МПа, выдержка материала в среде инертных газов. Однако при реализации метода искрового плазменного спекания и других методов, основанных на печах различной конструкции и принципа действия затрачиваются значительные энергетические ресурсы; требуется сложное дорогостоящее оборудование. Вследствие чего необходимо развитие простых и энергоэффективных методов получения НЕС. Данную задачу можно решить электродуговым методом [4–5].

В данной работе на лабораторном стенде реализован электродуговой плазменный безвакуумный метод [6] синтеза высокоэнтропийного однофазного карбида  $\text{TiZrNbHfTaC}_5$ . В качестве прекурсоров использовались коммерческие порошки оксидов металлов  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZrO}_2$  чистотой не хуже 99,9 % (Rare Metals Corp., Russia) со средним размером частиц до 10 мкм и рентгеноаморфный углерод чистотой не хуже 99 % (Hi-Tech Carbon Corp., China). Порошки смешивались в шаровой мельнице в течение не менее 6 часов, закладывались в рабочую зону дугового реактора и обрабатывались электрической дугой не менее 3 раз.

### Список литературы

1. Wuchina E. *UHTCs: Ultra-High Temperature Ceramic Materials for Extreme Environment Applications // Soc. Interface*, 2007. – Vol. 16. – P. 30.
2. Opeka M. M. *Ultra High Temperature Ceramic Composites // J. Eur. Ceram. Soc.*, 1999. – Vol. 19. – P. 2405.
3. D. Demirskiy. *Synthesis and high-temperature properties of medium-entropy (Ti, Ta, Zr, Nb)C using the spark plasma consolidation of carbide powders // Open Ceramics*, 2020. – Vol. 2. – P. 100015.
4. Zhen Zhang. *Arc melting: a novel method to prepare homogeneous solid solutions of transition metal carbides (Zr, Ta, Hf) // Ceramics International*, 2019. – Vol. 45. – P. 9316–9319.
5. Wen Hao Kan. *Precipitation of (Ti, Zr, Nb, Ta, Hf)C high entropy carbides in a steel matrix // Materialia*, 2020. – Vol. 9. – P. 100540.
6. Pak A. Ya., Grinchuk P. S., Gumovskaya A. A., Vassilyeva Yu. Z. *Synthesis of transition metal carbides and high-entropy carbide  $\text{TiZrNbHfTaC}_5$  in self-shielding DC arc discharge plasma // Ceramics International*, 2022. – Vol. 48. – P. 3818–3825.

Был оценен фазовый состав полученного порошка с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 7000s. На рисунке 1 представлена типичная картина рентгеновской дифракции, на которой видно, что после воздействия плазмы на смесь исходных порошков образовался однофазный высокоэнтропийный карбид с решеткой типа NaCl. Оцененный параметр решетки равен 4,533 Å, что соответствует известным представлениям об этой фазе [5]. На сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU была проанализирована микроразмерная фракция продукта синтеза. Было выявлено, что в составе продукта синтеза имеются кристаллические частицы размером от 5 до 50 мкм, в которых равномерно распределены Ti, Zr, Nb, Hf, Ta.

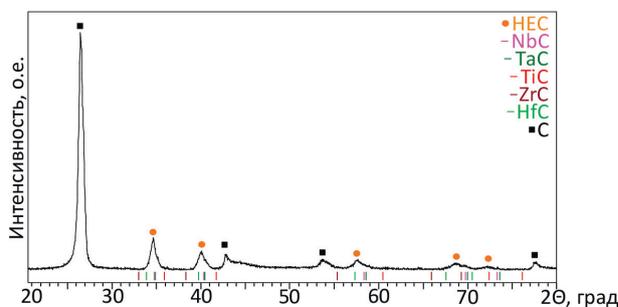


Рис. 1. Картина рентгеновской дифракции

Благодарности: в работе применялось оборудование ЦКП НМНТ ТПУ, поддержанного проектом Минобрнауки России №075-15-2021-710. Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №21-79-10030.