

**ПОЛУЧЕНИЕ УЛЬТРАТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДОВ**

А.А. СВИНУХОВА, А.А. КУЗНЕЦОВА

Томский политехнический университет

E-mail: aag109@tpu.ru

Высокоэнтропийные карбиды (НЕС) – это новый класс сверхвысокотемпературной керамики (УНТС), вызывающей значительный интерес из-за ее высокой температуры плавления ($>3000\text{ }^{\circ}\text{C}$) [1]. НЕС представляют собой твердые растворы, содержащие углерод и четыре или более основных металлических компонента переходных металлов IV или V группы [2]. Основными методами синтеза НЕС является искровое плазменное спекание и горячее прессование [3,4]. Для получения материалов данными методами обычно требуются высокие температуры свыше $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, высокое давление свыше 50 МПа , а также наличие вакуума, что существенно увеличивает энергозатраты на процесс синтеза. Перспективным является использование электродугового плазменного метода ввиду возможности достижения высоких температур в широком диапазоне, обеспечение высоких скоростей нагрева [5]. Использование технологии безвакуумного электродугового метода синтеза, заключающегося в иницировании дугового разряда постоянного тока в открытой воздушной среде, позволяет значительно повысить энергоэффективность процесса получения НЕС, за счёт отсутствия энергозатрат на достижение и поддержание нужной степени вакуума. Данный метод уже использовался для синтеза НЕС [6]. Целью данной работы является получение высокоэнтропийных карбидов с различной долей титана в исходной смеси порошков.

Все экспериментальные исследования были проведены на лабораторном стенде Томского политехнического университета. Основными элементами лабораторного стенда являются графитовые анод и катод. Анод выполнен в форме стержня, а катод в форме полого цилиндра. В катод был установлен графитовый тигель малого размера, в который засыпалась смесь исходных реагентов. Для эксперимента была подготовлена смесь, состоящая из пяти металлов (титан, цирконий, ниобий, гафний, тантал) и углерода. Были подготовлены смеси, в которых титан, относительно других металлов, преобладал, и его доля составляла от 25 до 35 %. Порошки смешивались в шаровой мельнице (Mill 8000M Horiba Scientific, соотношение массы порошка к массе помольного тела составляло $2/3$) в течение 6 часов. После чего гомогенизированная смесь исходных реагентов подвергалась дуговому воздействию в течение 45 с при силе тока 450 А. После электродугового воздействия продукты синтеза были исследованы методом рентгеновской дифрактометрии (Shimadzu XRD 7000s, $\lambda=1.54060\text{ \AA}$, стандартное программное обеспечение Shimadzu).

На рисунке 1 представлены рентгеновские дифрактограммы исходных металлических порошков и углерода.

По результатам анализа определены дифракционные максимумы титана, циркония, ниобия, гафния, тантала и углерода. Данные идентифицируются согласно базе данных PDF4+.

На рисунке 2 представлены рентгеновские дифрактограммы продуктов синтеза: порошка высокоэнтропийного карбида TiZrNbHfTaC_5 (в эквимольном соотношении), а также порошков высокоэнтропийного карбида TiZrNbHfTaC_5 ($(\text{Ti}_{0,2}\text{Zr}_{0,2}\text{Nb}_{0,2}\text{Hf}_{0,2}\text{Ta}_{0,2})\text{C}$) с избытком доли титана: 25% - $(\text{Ti}_{0,25}\text{Zr}_{0,1875}\text{Nb}_{0,1875}\text{Hf}_{0,1875}\text{Ta}_{0,1875})\text{C}$; 30% - $(\text{Ti}_{0,30}\text{Zr}_{0,175}\text{Nb}_{0,175}\text{Hf}_{0,175}\text{Ta}_{0,175})\text{C}$; и 35% $(\text{Ti}_{0,35}\text{Zr}_{0,1625}\text{Nb}_{0,1625}\text{Hf}_{0,1625}\text{Ta}_{0,1625})\text{C}$.

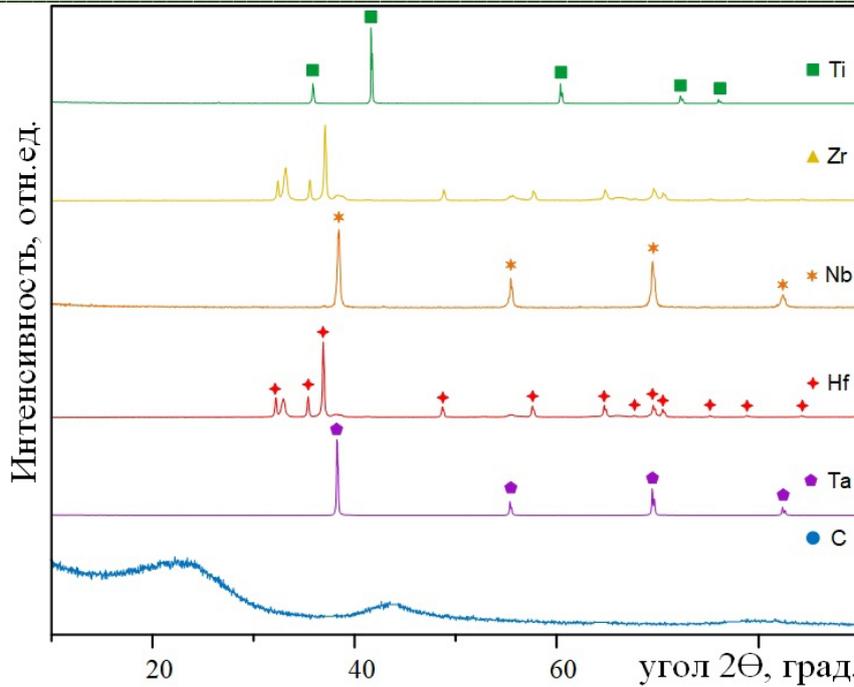


Рисунок 1 – Рентгеновские дифрактограммы исходных реагентов

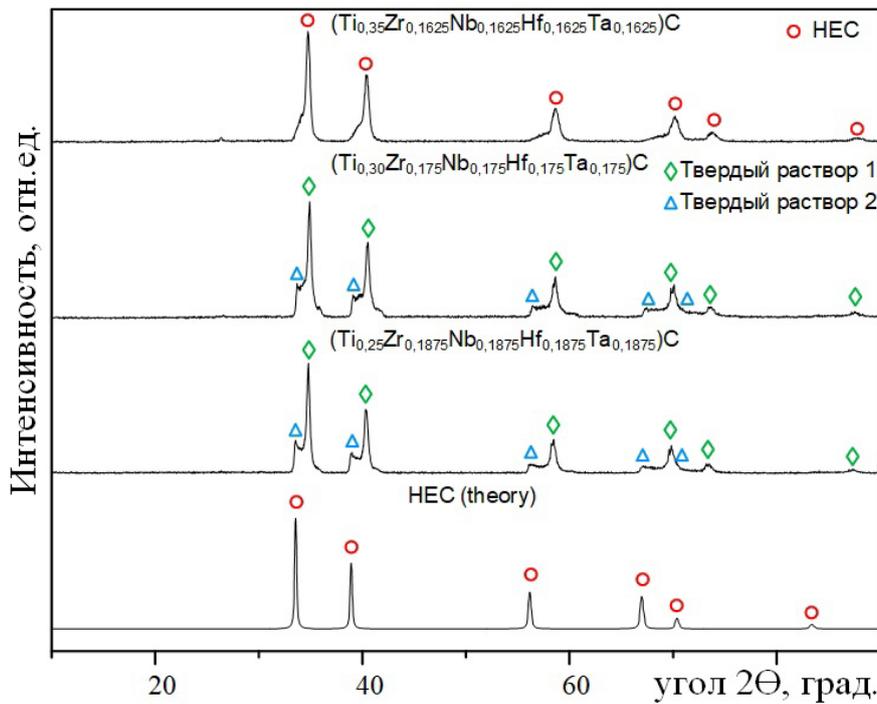


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы продуктов синтеза

По рентгеновским дифрактограммам продуктов синтеза видно, что дифракционные максимумы порошка, содержащего 35 % титана, более однозначно идентифицируются, как дифракционные максимумы одного высокоэнтропийного карбида с кубической решеткой типа NaCl. Порошки, содержащие 25 % и 30 % титана, идентифицируются как смесь двух твердых растворов.

Благодарность: работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект №21-79-10030.

Список литературы

1. Castle E., Csanádi T., Grasso S., Dusza J., Reece M. Processing and Properties of High-Entropy Ultra-High Temperature Carbides, *Nature, Scientific reports* // *Scientific Reports*. – 2018. – V. 8. – 8609. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26827-1>.
2. Harrington T.J., Gild J., Sarker P., et al. Phase stability and mechanical properties of novel high entropy transition metal carbides // *Acta Materialia*. – 2019. – V. 166. – P. 271-280. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.054>.
3. Demirskyi D., Suzuki T.S., Yoshimi K., et al. Synthesis and high-temperature properties of medium-entropy (Ti,Ta,Zr,Nb)C using the spark plasma consolidation of carbide powders // *Open Ceramics*. – 2020. – V. 2. – 100015. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2020.100015>.
4. B. Ye, Wen T., Liu D., Chu Ya. Oxidation behavior of (Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})C high-entropy ceramics at 1073-1473 K in air // *Corrosion Science*. – 2019. – V. 153. – P. 327–332. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.04.001>.
5. Zhang Zh., Fu Sh., Aversano F., et al. Arc melting: a novel method to prepare homogeneous solid solutions of transition metal carbides (Zr, Ta, Hf) // *Ceramics International*. – 2019. – V. 45. – P. 9316–9319. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.01.238>.
6. Pak A.Ya., Grinchuk P.S., Gumovskaya A.A., Vassilyeva Yu.Z. Synthesis of transition metal carbides and high-entropy carbide TiZrNbHfTaC₅ in self-shielding DC arc discharge plasma // *Ceramics International*. – 2022. – V. 48. – I. 3. – P. 3818-3825. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.165>.