

Рис. 3. Суточная циклограмма заряда аккумуляторных батарей большой емкости

Заключение

Сравнивая варианты построения ДЭС, видно, что применение системы накопления электроэнергии с возможностью энергообмена позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы дизельных систем электроснабжения. Для рассмотренного примера, годовой расход топлива сокращается на 10931,64 литров и его стоимость на 843922,6 рублей, по сравнению с вариантом классической ДЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информация об объеме производства и фактических расходах на производство 1 кВт·ч электрической энергии за 2021 г. URL: <http://www.rushydro.ru/press/holding-news/112186.html> (дата обращения 11.03.2023).
2. Типовые суточные графики электрических нагрузок. URL: <https://online-electric.ru/> (дата обращения 02.04.2023).
3. Дизельные генераторы Фрегат. URL: <https://dgufregat.ru/> (дата обращения 13.04.2023).
4. Дизельные генераторы. Сайт завода Амперос. URL: <https://mge-power.ru/product/dizelnyy-generator-baudouin-mger16bn> (дата обращения 19.04.2023).
5. Литий-железо-фосфатные LiFePo4 аккумуляторы. URL: <https://lifepo4.ru/akkumulyator-lifepo4-24v-560ah> (дата обращения 27.04.2023).
6. Правила устройства электроустановок: Все действующие разделы ПУЭ7. – Новосибирск: Сиб. Унив. изд-во, 2009. – 853 с.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДОВ

А.А. Свинухова¹, А.П. Корчагина²

Томский политехнический университет,
ИШЭ, ОЭФ, гр. АЗ-08¹; ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, гр. 5БМ22²

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

Высокие темпы развития промышленности побуждают искать новые современные материалы способные удовлетворить растущие потребности. На данный момент особенно актуальны материалы способные выдерживать высокие и сверхвысокие температуры для применения в аэрокосмической отрасли и в энергетике [1]. Потенциальным кандидатом для использования в таких условиях является сверхвысокотемпературная керамика (УНТС), характеризующаяся температурой плавления 3300 К [2]. Но ввиду повышающихся требований

данный класс материалов не всегда отвечает поставленным задачам, что приводит к исследованиям новых материалов, в частности, высокоэнтропийных карбидов [3].

Высокоэнтропийная керамика представляет собой твердый раствор из четырех и более основных компонентов карбидов переходных металлов в почти эквимолярных соотношениях или, по крайней мере, с содержанием каждого элемента от 5 до 35 ат. % в однофазной структуре [4]. Высокоэнтропийные карбиды металлов привлекли огромное внимание для потенциальных применений в различных областях, таких как аэрокосмическая промышленность, режущие инструменты и ядерные реакторы. Такое широкое применение обусловлено необычным сочетанием привлекательных физико-химических свойств этих соединений: температура плавления, превышающая 3000 К, высокая твердость, химическая инертность, хорошие электро- и теплопроводность, и низкое поглощение нейтронов [5].

На данный момент существует ряд широко известных методик для синтеза высокоэнтропийной керамики. Высокоэнтропийная керамика может быть получена методом искрового плазменного спекания (SPS) с предварительной высокоэнергетической обработкой порошковых смесей компонентов в шаровых мельницах [6], методом спекания во вспышке (FS) [7], спеканием без давления (PS) [8], горячим прессованием (HP) [9] и реактивным высокоэнергетическим шаровым измельчением (R-HEBM) [10].

Несмотря на достоинства каждая из этих методик характеризуется большими энергетическими затратами, что в конечном счете влияет на стоимость полученного материала. Основными причинами являются: большая длительность процесса синтеза, использование вакуумного оборудования, применение вспомогательных веществ (инертные газы, растворы). Альтернативным вариантом получения высокоэнтропийных карбидов может служить электродуговой синтез.

Электродуговой синтез – перспективная ветвь развития получения керамических материалов. Реализация данного метода в открытой воздушной среде с достижением эффекта экранирования реакционного объема генерирующимся потоком газов диоксида углерода и монооксида позволяет отказаться от вакуумного оборудования и упростить устройство дугового реактора. В совокупности с небольшим количеством времени, требующимся для синтеза, данный метод можно назвать энергоэффективным и многообещающим. Ранее уже было успешно апробировано получение высокоэнтропийной керамики HfTaTiNbZrC_5 электродуговым безвакуумным методом [11–13].

Все эксперименты были выполнены на оригинальном безвакуумном электродуговом реакторе, разработанном в лаборатории Томского политехнического университета. Основными элементами реактора являются графитовые анод и катод, которые подключены к источнику постоянного тока. В качестве исходных реагентов были взяты порошки чистых металлов (титан, цирконий, ниобий, гафний, тантал) и углерод с размером частиц не более 10 мкм. Исходная смесь реагентов подвергалась гомогенизации в шаровой вибрационной мельнице Retsch mm 500. После гомогенизации смесь порошков закладывалась в графитовый тигель и подвергалась плазменному воздействию в течение 45 с при силе постоянного тока 200 А. В процессе синтеза электрические параметры реактора регистрировались двухканальным осциллографом Rigol 1052E.

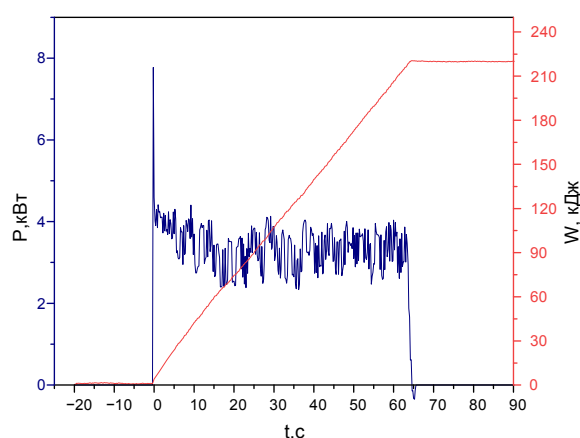


Рис. 1. Осциллограммы мощности и напряжения в зависимости от времени

Электрические параметры синтеза такие, как напряжение, ток и время фиксировались с помощью двухканального цифрового осциллографа. На основании данных осциллографа были рассчитаны следующие параметры: изменение энергии и мощности в зависимости от времени (рис. 1).

При синтезе высокоэнтропийного карбида TiZrNbHfTaC_5 было проведено 27 экспериментов, исходя из полученных значений выполнен анализ однородности распределения полученных данных.

На основании проведенных экспериментов были получены следующие результаты: среднее значение напряжения $32,78 \pm 3,30$ В; среднее значение тока $108,78 \pm 5,4$ А; среднее значение мощности $3,44 \pm 0,23$ кВт; среднее значение энергии $221,63 \pm 10,94$ кДж. Исходя из полученных экспериментальных данных можно считать, что электродуговой безвакуумный синтез энергоэффективен и является хорошей альтернативой существующим методикам получения высокоэнтропийных карбидов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-10030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Synthesis and high-temperature properties of medium-entropy (Ti,Ta,Zr,Nb)C using the spark plasma consolidation of carbide powders / D. Demirskyi, T.S. Suzuki, K. Yoshimi, O. Vasylykiv // *Open Ceramics*. – 2020. – V. 2. – P. 1–9. – ISSN: 2666-5395.
2. Permeability and mechanical integrity of porous biomorphic SiC ceramics for application as hot-gas filters / A. Gómez-Martín, M.P. Orihuela, J.A. Becerra, J. Martínez-Fernández, J. Ramírez-Rico // *Materials and Design*. – 2016. – V. 107. – P. 450–460. – ISSN: 1873-4197.
3. Phase, microstructure and related mechanical properties of a series of (NbTaZr)C-Based high entropy ceramics / Zhongtao Li et al. // *Ceramics International*. – 2021. – V. 47. – P. 14341–14347. – ISSN: 1873-3956.
4. Synthesis of single-phase (ZrTiTaNbMo)C high-entropy carbide powders via magnesiothermic reduction process / Baoqiang Li et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2022. – V. 42. – P. 6767–6773. – ISSN: 1873-619X.
5. Theory of bonding in transition-metal carbides and nitrides / J. Häglund, A. Fernández Guillermet, G. Grimvall, M. Körling // *Physical Review B*. – 1993. – V. 48. – P. 11685–11691. – ISSN 2469-9969.
6. High-entropy carbide: A novel class of multicomponent ceramics / Jieyang Zhou, Jinyong Zhang, Fan Zhang, Bo Niu, Liwen Lei, Weimin Wang // *Ceramics International*. – 2018. – V. 44. – P. 22014–22018. – ISSN: 1873-3956.
7. Reactive flash spark plasma sintering of high-entropy ultrahigh temperature ceramics / Joshua Gild, Kevin Kaufmann, Kenneth Vecchio, Jian Luo // *Scripta Materialia*. – 2019. – V. 170. – P. 106–110. – ISSN: 1872-8456.
8. Pressureless sintering and properties of $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})\text{C}$ high-entropy ceramics: The effect of pyrolytic carbon / Duo Yu et al. // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2021. – V. 41. – P. 3823–3831. – ISSN: 1873-619X.
9. First-principles study, fabrication, and characterization of $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})\text{C}$ high-entropy ceramic / Beilin Ye, Tongqi Wen, Kehan Huang, Cai-Zhuang Wang, Yanhui Chu // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2019. – V. 102. – P. 4344–4352. – ISSN: 1551-2916.
10. High-entropy (HfTaTiNbZr)C and (HfTaTiNbMo)C carbides fabricated through reactive high-energy ball milling and spark plasma sintering / D.O. Moskovskikh et al. // *Ceramics International*. – 2020. – V. 46. – P. 19008–19014. – ISSN: 1873-3956.
11. Synthesis of transition metal carbides and high-entropy carbide TiZrNbHfTaC_5 in self-shielding DC arc discharge plasma / A.Ya. Pak, P.S. Grinchuk, A.A. Gumovskaya, Yu.Z. Vassilyeva // *Ceramics International*. – 2022. – V. 48. – P. 3818–3825. – ISSN: 1873-3956.
12. Production of HfTaTiNbZrC₅ High-Entropy Carbide Micropowder in the Plasma of an Atmospheric Pressure Arc Discharge / A.Ya. Pak, P. S. Grinchuk, G. Ya. Mamontov, T. Yu. Yakich, A. A. Gumovskaya // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2021. – V. 94. – P. 88–94. – ISSN 1573-871X.
13. Machine learning-driven synthesis of TiZrNbHfTaC_5 high-entropy carbide / A.Ya. Pak, V. Sotskov, A.A. Gumovskaya et al. // *npj Computational Materials*. – 2023. – V. 9. – P. 1–11. – ISSN 2057-3960.