

utilization and reducing environmental impact. The swirling motion of gases enhances fuel-air mixing, leading to more complete combustion, lower unburned carbon losses, and improved heat transfer efficiency. The research demonstrates that optimizing key parameters such as turbulence intensity, excess air ratio, and fuel properties can significantly enhance the overall performance of vortex furnaces.

- [1] Burda Yuri, Cherednik Artem, Pivnenko Yuri, Cherednik Dymytrii // Analysis of the efficiency of packed scrubbers and electric filters // The 9th International scientific and practical conference "Theoretical and practical aspects of the development of science and education" (March 05–08, 2024) Prague, Czech Republic. International Science Group. 2024. 349 p. //
- [2] Firth A. et al. Quantification of global waste heat and its environmental effects Appl. Energy (2019)
- [3] Wang C. et al. Experimental study on heat pipe thermoelectric generator for industrial high temperature waste heat recovery Appl. Therm. Eng. (2020)
- [4] Andriy Redko, Adam Ujma, Anna Pavlovska, Yuri Burda, Volodymyr Andoniev // Engineering for Rural Development. Proceedings of the International Scientific Conference (Latvia), 2021
- [5] Trafczynski M. et al. Energy saving potential of a simple control strategy for heat exchanger network operation under fouling conditions Renew. Sustain. Energy Rev. (2019)

УДК 620.18

ЕЛЕКТРОСПІКАННЯ НАНОПОРОШКІВ ДІОКСИДУ ЦИРКОНІЮ, СИНТЕЗОВАНИХ МЕТОДОМ РОЗКЛАДАННЯ ФТОРИДНИХ СОЛЕЙ

ELECTROSINTERING OF ZIRCONIUM DIOXIDE NANOPOWDERS SYNTHESIZED BY THE DECOMPOSITION OF FLUORIDE SALTS

*канд. техн. наук В. П. Нерубацький,
д-р техн. наук Е. С. Геворкян*

Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків

*V.P. Nerubatskyi, PhD (Tech.),
E.S. Hevorkian, D.Sc. (Tech.)*

Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)

Поєднання особливих характеристик, таких як підвищена міцність, в'язкість руйнування, висока твердість, зносостійкість, низькі коефіцієнти тертя, а також хімічна та біологічна інертність робить діоксид цирконію (ZrO_2) виключно перспективним матеріалом для застосування у багатьох технічних сферах. Він знайшов широке застосування при створенні високовогнетривких виробів, жаростійких емалей, стійкого до високих температур скла, різноманітних керамічних виробів, керамічних пігментів, твердих електролітів, захисних термічних покриттів, каталізаторів, штучних дорогоцінних каменів, а також під час виробництва різальних інструментів та абразивних матеріалів.

В даний час діоксид цирконію стрімко поширюється на нові сфери застосування, такі як медицина, волоконна оптика та виробництво електронної кераміки. Важливо відзначити, що найбільш вражаючі значення механічної міцності та тріщиностійкості, при збереженні стійкості до корозії та зношування,

демонструє кераміка, заснована на діоксиді цирконію, додатково стабілізованому оксидом ітрію (Y_2O_3) [1]. Це зумовлено ефектом трансформаційного зміцнення, пов'язаним з фазовим перетворенням діоксиду цирконію з тетрагональної ($T-ZrO_2$) в моноклінну ($M-ZrO_2$) модифікацію при впливі механічного напруження [2]. Одним з недоліків кераміки $ZrO_2(Y_2O_3)$ є те, що її механічні властивості схильні до деградації (процесу старіння) при впливі вологи за температур до $300\text{ }^\circ\text{C}$, а також в агресивних біологічних середовищах [3]. З метою покращення стабільності діоксиду цирконію, особливо для гідротермальних умов, застосовувалися різні підходи. Серед них можна виділити збереження розмірів зерен у матеріалах на рівні нижче критичного значення [4], спільну стабілізацію ZrO_2 за допомогою оксидів ітрію та церію (SeO_2) [5, 6], а також розробку композитів на основі ZrO_2 з додаванням від 1 до 8 масових відсотків Al_2O_3 , WC [7]. Основні труднощі отримання діоксид-цирконієвої кераміки з високими механічними властивостями полягають у забезпеченні контролю за її фазовим складом і структурою у процесі електроконсолідації.

В роботі досліджувалися особливості одержання композитів із синтезованих нанопорошків оксиду цирконію з різними складами стабілізаторів Y_2O_3 , SeO_2 . Морфологічні характеристики синтезованих нанопорошків, а також фізико-механічні властивості було одержано гарячим пресуванням методом електроконсолідації (електроспікання) [8]. Застосування методу електроконсолідації дало змогу досягти високої стійкості та стабільних фізико-механічних властивостей розробленої композитної кераміки на базі ZrO_2 .

Отримані експериментальні дані показують, що розроблена кераміка на основі композиту ZrO_2 –15 мас.% SeO_2 характеризується межею міцності при вигині в 690 МПа, а кераміка ZrO_2 –15 мас.% Y_2O_3 за температури спікання $1500\text{ }^\circ\text{C}$ характеризується досить високою в'язкістю – $5,8\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, а також твердістю 14,8 ГПа порівняно з керамікою з добавками діоксиду церію. Ці показники, а також мікроструктура матеріалу (середній розмір зерна – менше 0,3 мкм), відповідають вимогам міжнародних стандартів, які висуваються до матеріалів на основі тетрагонального діоксиду цирконію, які використовуються для виготовлення керамічних імплантатів для кісткової хірургії [9].

Отже, отриманий матеріал характеризується високою чистотою та міцністю, має щільну мікроструктуру із середнім розміром зерна 0,25 мкм, а також демонструє стабільність фазового складу та механічних характеристик. Ці властивості роблять спечений матеріал привабливим не лише для конструкційних (наприклад, для виготовлення окремих деталей чи елементів вузлів транспортних засобів), але й медичних застосувань. У разі, якщо твердість і тріщиностійкість матеріалів з обома добавками виявляються на подібному рівні, міцність на вигин матеріалу з добавкою 15 мас.% SeO_2 виявляється вищою. Імовірно, це пов'язано з морфологією вихідних синтезованих нанопорошків, що вказує на необхідність більш детального дослідження як умов синтезу даних нанопорошків, так і фізико-механічних властивостей діоксиду цирконію з добавками з оксиду церію для більш глибокого розуміння його впливу.

- [1] Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Nerubatskyi V. P., Vovk R. V., Gevorkyan E. S., Morozova O. M. Detection of regularities of $Y_2Zr_2O_7$ pyrochlor phase formation during the reaction of solid-phase synthesis under different temperature-time conditions. *Functional Materials*. 2022. Vol. 29, No. 1. P. 30–38. DOI: 10.15407/fm29.01.30.
- [2] Hannink H. J., Kelly P. M., Muddle B. C. Transformation toughening in zirconia-containing ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2000. Vol. 83, Iss. 3. P. 461–487. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x.
- [3] Chevalier J., Gremillard L., Deville S. Low-temperature degradation of zirconia and implications for biomedical implants. *Annual Review of Materials Research*. 2007. Vol. 37. P. 1–32. DOI: 10.1146/annurev.matsci.37.052506.084250.
- [4] Djurado E., Bouvier P., Lucazeau G. Crystallite size effect on the tetragonal-monoclinic transition of undoped nanocrystalline zirconia studied by XRD and raman spectrometry. *Journal of Solid State Chemistry*. 2000. Vol. 149, Iss. 2. P. 399–407. DOI: 10.1006/jssc.1999.8565.
- [5] Lin J. D., Duh J. G. Fracture toughness and hardness of ceria- and yttria-doped tetragonal zirconia ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2002; Vol. 78. P. 253–261. DOI: 10.1016/S0254-0584(02)00327-9.
- [6] Mamalis A. G., Hevorkian E. S., Nerybatskyi V. P., Rucki M., Krzysiak Z., Morozova O. M. Effect of nanoadditives on the properties of partially stabilized zirconia. *Nanotechnology Perceptions*. 2023. Vol. 19, No. 3. P. 26–46. DOI: 10.56801/nano-ntp.v19i3.325.
- [7] Gevorkyan E., Prikhna T., Vovk R., Rucki M., Siemiatkowski Z., Kucharczyk W., Chishkala V., Chalko L. Sintered nanocomposites ZrO_2 -WC obtained with field assisted hot pressing. *Composite Structures*. 2021. Vol. 259. P. 113443. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113443.
- [8] Hevorkian E. S., Nerubatskyi V. P., Rucki M., Kilikevicius A., Mamalis A. G., Samociuk W., Morozow D. Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 100–113. DOI: 10.56801/nano-ntp.v20i1.363.
- [9] Hevorkian E. S., Morozova O. M., Nerubatskyi V. P., Chyshkala V. O., Sofronov D. S., Moya S., Abarategi A., Arnaiz B., Bondarenko M. A., Vovk R. V. Composite material based on zirconium dioxide partially stabilised with cerium oxide and aluminium oxide for bioengineering applications. *Functional Materials*. 2024. Vol. 31, No. 3. P. 351–358. DOI: 10.15407/fm31.03.351.

УДК504.063:69.009.1:699.8

ВПЛИВ ЗАПЛАНОВАНОГО СКОРОЧЕННЯ РІВНЯ ВИКИДІВ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ НА ВЕЛИЧИНУ ТЕРМІЧНОГО ОПОРУ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ У НОРМАТИВНИХ ДОКУМЕНТАХ

IMPACT OF PLANNED REDUCTION IN GREENHOUSE GAS EMISSIONS ON THE THERMAL RESISTANCE OF ENCLOSING STRUCTURES IN REGULATORY DOCUMENTS

О. В. Панчук

Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)

O. V. Panchuk

Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)

Екологічна ситуація, яка склалася в світі на початку 90-х років минулого століття призвела до того, що велика кількість розвинених країн прийняли рішення про зобов'язання щодо кількісних обмежень і скорочень викидів в межах Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC). Україна підписала Конвенцію 11 червня 1992 року і ратифікувала 29 жовтня 1996 року. Станом на березень 2014 року до РКЗК ООН приєдналися 196 учасників. Сторони конвенції зустрічаються щорічно з 1995