

УДК 620.22:621.762

**РОЗРОБЛЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ НАНОСТРУКТУРНОЇ КЕРАМІКИ
 $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)$ –WC МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОКОНСОЛІДАЦІЇ
ДЛЯ ПОТРЕБ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки,

Український державний університет залізничного транспорту,

e-mail: nerubatskyi@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4309-601X

Геворкян Едвін Спартакович, доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції,

Український державний університет залізничного транспорту,

e-mail: edsgev@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0521-3577

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції,

Український державний університет залізничного транспорту,

e-mail: komarova@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8597-5891

Волошина Людмила Володимирівна, кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції,

Український державний університет залізничного транспорту,

e-mail: vol@kart.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2039-111X

Лобойко Максим Олександрович, здобувач вищої освіти,

Український державний університет залізничного транспорту,

e-mail: loboyko7@kart.edu.ua

Енергетична безпека та промислова стійкість країни безпосередньо визначаються рівнем розвитку та впровадження сучасних технологій виробництва конструкційних матеріалів, які здатні витримувати значні та критичні навантаження протягом тривалого часу експлуатації. Сучасні енергосистеми, що характеризуються високим ступенем автоматизації та інтенсивністю виробничих процесів, висувають нові вимоги до технічних параметрів обладнання, а саме до його довговічності, стійкості до зносу та надійності функціонування в умовах підвищених навантажень.

Особливо актуальним стає забезпечення надійної роботи деталей енергетичного обладнання, таких як насосні системи, запірні арматури, турбомашини та інші механізми, що функціонують в умовах постійного тертя, високих температур та впливу агресивних хімічних середовищ. В таких умовах традиційні металеві матеріали часто демонструють обмежений ресурс експлуатації, поступово вичерпуючи свій ліміт надійності та безпечності. Це, у свою чергу, стимулює розвиток і підвищує інтерес до перспективних альтернативних рішень, зокрема до наноструктурної кераміки, яка поєднує високу механічну міцність, термостійкість та хімічну інертність, забезпечуючи більш

стабільну та довготривалу роботу енергетичного обладнання в складних експлуатаційних умовах. Особливе місце у цьому напрямку посідає наноконпозиційна кераміка системи $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)-WC$. Поєднання матриці діоксиду цирконію, яка має унікальний механізм трансформаційного зміцнення, з нанодисперсним карбідом вольфраму дає змогу створити поліфункціональний матеріал із високою в'язкістю руйнування та надзвичайною твердістю [1, 2].

Проте, отримання таких систем вимагає інноваційних підходів до консолідації, оскільки тривале термічне спікання не дозволяє зберегти нанорозмірну структуру зерен.

Метод електроконсолідації [3, 4] є ключовою енергоефективною технологією, що дозволяє суттєво скоротити час обробки та забезпечити формування безпористої структури. Для промисловості країни розробка таких матеріалів є стратегічним кроком до зниження експлуатаційних витрат та імпортозаміщення критичних вузлів енергетичного обладнання.

Сучасні тенденції в галузі нанотехнологій вказують на те, що властивості нанокристалічних матеріалів визначаються надзвичайно малим розміром зерен та великою протяжністю їхніх меж [5]. Встановлено, що введення органічних модифікаторів на етапі підготовки шихти дозволяє керувати процесами фазоутворення та отримувати консолідовані матеріали із заданими характеристиками [6]. Дослідження впливу різних нанодобавок (Al_2O_3 , WC , SiC) на матрицю ZrO_2 продемонстрували можливість створення функціонально-градієнтних матеріалів із покращеною мікроструктурою [7, 8].

Важливим аспектом є теоретичне обґрунтування процесів ущільнення. Моделі, що описують кінетику дифузійного масопереносу при гарячому пресуванні, підтверджують ефективність поєднання тиску та електричного поля для досягнення максимальної щільності [9, 10]. Вивчення особливостей структуроутворення багатокомпонентних композитів на основі силіцидів та карбідів вказує на перспективність використання ультрадисперсних домішок для підвищення фізико-механічних властивостей. Також доведено можливість отримання безкобальтових ріжучих вставок на основі наноструктурного WC , що має пряме відношення до розробки зносостійких деталей для машинобудування [11, 12]. Питання фазового складу та морфології плазмохімічних порошків ZrO_2 також залишаються актуальними для створення стабільних наноструктур.

Під час проведення експериментів з отримання енергоефективної наноконпозиційної кераміки $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)-WC$ методом електроконсолідації для виготовлення зносостійких вузлів промислового обладнання використовувалися нанопорошки діоксиду цирконію, частково стабілізовані оксидом ітрію, та карбиду вольфраму з розміром частинок у діапазоні 40–80 нм. Процес підготовки сумішей включав планетарне подрібнення в спиртовому середовищі з додаванням поверхнево-активних речовин.

Електроконсолідація проводилася при температурі 1450 °C з витримкою протягом 5–8 хвилин під тиском до 60 МПа. Швидкість нагріву підтримувалася

на рівні 150–200 °C/хв. Такий режим дозволив мінімізувати термічну деградацію наноструктури та забезпечити високу щільність матеріалу.

Порівняно з вакуумним спіканням, метод електроконсолідації демонструє значне зниження енергоспоживання. Це досягається за рахунок того, що джерелом тепла є безпосередньо прес-форма та зразок, що пропускають струм. Математичне моделювання вказує на те, що ефективний тиск та в'язкість пористого середовища при електроактивації дозволяють досягти щільності > 99 % за значно менший час. Це зменшує питомі витрати електроенергії на одиницю готової продукції на 50–70 %.

Частинки карбиду вольфраму інтегруються в матрицю ZrO_2 , розташовуючись переважно по межах зерен. Це створює ефект «анкерування», що перешкоджає росту зерен діоксиду цирконію при високих температурах. Рентгенофазовий аналіз підтверджує стабільність тетрагональної фази, яка забезпечує високу тріщиностійкість матеріалу.

Отримані зразки кераміки $ZrO_2(3 \text{ мол. \% } Y_2O_3)$ –WC характеризуються твердістю до 20 ГПа. Матеріал виявляє високу стійкість до ерозійного зносу, що робить його ідеальним для запірної арматури енергоблоків та деталей насосів, які працюють з абразивними середовищами. Крім того, наявність WC забезпечує достатню електропровідність для проведення прецизійної електроерозійної обробки виробів складної форми.

Таким чином, розроблення наноструктурної кераміки $ZrO_2(3 \text{ мол. \% } Y_2O_3)$ – WC методом електроконсолідації є ефективним рішенням для забезпечення потреб сучасної промисловості країни. Встановлено, що дана технологія забезпечує поєднання високих механічних характеристик зі значною економією енергоресурсів при виробництві, що є критично важливим для відновлення промислового потенціалу. Застосування таких матеріалів у вітчизняних енергосистемах та машинобудуванні дозволить підвищити експлуатаційну надійність вузлів, суттєво зменшити частоту регламентних ремонтних робіт та гарантувати стабільну роботу обладнання в умовах екстремальних навантажень.

Це створює надійне науково-технологічне підґрунтя для впровадження високоресурсних конструкційних рішень у стратегічно важливих галузях промисловості країни.

Література

1. **Ratov B. T. et al.** Effect of the ZrO_2 content on the strength characteristics of the matrix material of Cdiamond–(WC–Co) composites synthesized by spark plasma sintering. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, iss. 3. P. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457624030079>.
2. **Ratov B. T. et al.** Features structure of the Cdiamond–(WC–Co)– ZrO_2 composite fracture surface as a result of impact loading. *Journal of Superhard Materials*. 2023. Vol. 45, iss. 5. P. 348–359. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457623050088>.
3. **Gevorkyan E. et al.** Analysis of the electroconsolidation process of fine-dispersed structures out of hot pressed Al_2O_3 –WC nanopowders. *Materials*. 2021. Vol. 14, iss. 21. 6503. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14216503>.

4. **Hevorkian E. et al.** Microstructure and properties of binderless μ WC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*. 2025. Vol. 18, iss. 20. 4646. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18204646>.
5. **Mamalis A. G. et al.** Effect of nanoadditives on the properties of partially stabilized zirconia. *Nanotechnology Perceptions*. 2023. Vol. 19, no. 3. P. 26–46. DOI: <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v19i3.325>.
6. **Nerubatskyi V. P. et al.** Peculiarities of obtaining nanocomposites with organic additives and consolidated nanomaterials with given properties. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, no. 11. P. 1283–1288. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0021375>.
7. **Sarmah P. et al.** Fabrication of novel hybrid Al-SiC-ZrO₂ composites via powder metallurgy route and intelligent modeling for their microhardness. *Ceramics*. 2025. Vol. 8, iss. 3. 91. DOI: <https://doi.org/10.3390/ceramics8030091>.
8. **Khan A. et al.** Structural and mechanical properties of Al-SiC-ZrO₂ nanocomposites fabricated by microwave sintering technique. *Crystals*. 2020. Vol. 10, iss. 10. 904. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst10100904>.
9. **Gevorkyan E. et al.** Theoretical model of the densification during hot pressing and its verification. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 1. P. 113–123. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-00805-4_10.
10. **Mamalis A. G. et al.** Peculiarities of obtaining nanostructured materials compacted by the method of hot pressing due to the passage of direct electric current. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, no. 1. P. 61–71.
11. **Kurbanbekov S. et al.** Properties, advantages, and prospects of using cobalt-free composites based on tungsten carbide in industry. *Materials*. 2025. Vol. 18, iss. 1. 129. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18010129>.
12. **Gevorkyan E. et al.** Feasibility of cobalt-free nanostructured WC cutting inserts for machining of a TiC/Fe composite. *Materials*. 2021. Vol. 14, iss. 12. 3432. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14123432>.