

УДК 621.762

Володимир Нерубацький, канд. техн. наук, доц.; Артур Каграманян, канд. техн. наук, доц.; Ганна Комарова, канд. техн. наук, доц.; Олена Зінченко, канд. техн. наук; Дмитро Волошин, канд. техн. наук, доцент

Український державний університет залізничного транспорту, Україна

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОКОМПОЗИТІВ ZrO_2-WC

Анотація. У роботі проведено системний аналіз розробок у сфері створення керамічних нанокompозитів системи ZrO_2-WC . Визначено ключові фізико-технологічні параметри та встановлено їх залежність від режимів електроконсолідації та чинників експлуатаційного впливу в промисловому секторі.

Ключові слова: нанокompозити, діоксид цирконію, карбід вольфраму, електроконсолідація, зносостійкість.

Volodymyr Nerubatskyi, Arthur Kagramanian, Hanna Komarova, Olena Zinchenko, Dmytro Voloshyn

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF ZrO_2-WC NANOCOMPOSITES

Abstract. The paper presents a systematic analysis of developments in the field of ZrO_2-WC ceramic nanocomposites. Key physical and technological parameters are determined, and their dependence on electroconsolidation modes and operational factors in the industrial sector is established.

Keywords: nanocomposites, zirconium dioxide, tungsten carbide, electroconsolidation, wear resistance.

Вступ. Сучасна стратегія відновлення та інноваційного розвитку промислового комплексу України, зокрема залізничного транспорту, базується на інтеграції інтелектуальних технологій у процеси створення матеріалів із наперед програмованими властивостями. У цьому контексті особливої актуальності набуває забезпечення надійної роботи вузлів тертя та конструкційних елементів, що функціонують у критичних умовах: в агресивних середовищах та при інтенсивному кавітаційному зносі. Ефективне функціонування промислового сектору в сучасних умовах потребує впровадження зносостійких матеріалів вітчизняного виробництва для зниження залежності від імпорту складників. Використання керамічних композитів дозволяє оптимізувати витрати на експлуатацію техніки та підвищити конкурентоспроможність українського машинобудування.

Основна частина. Для обґрунтування вибору системи ZrO_2-WC проведено аналіз фізико-механічних характеристик нанокompозитів порівняно з традиційними матеріалами, що використовуються в аналогічних вузлах (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики зносостійких матеріалів

Матеріал	Твердість (HV, ГПа)	Тріщиностійкість (K_{IC} , МПа·м ^{1/2})	Термостійкість (°C)	Відносний ресурс
Сталь 40X (гарт.)	5,5–6,0	45–50	450	1,0
Твердий сплав ВК8	14,0–15,0	9–11	600	1,8
Кераміка ZrO_2-WC	17,5–19,0	8–12	950	2,5–3,0

Результати порівняльного аналізу вказують на те, що композит $\text{ZrO}_2\text{--WC}$ суттєво перевершує традиційні матеріали за ключовими показниками. Зокрема, твердість системи досягає 17,5–19,0 ГПа, що у поєднанні з високою термостійкістю забезпечує стабільну роботу вузлів у екстремальних умовах експлуатації. Додатковий аналіз показує, що підвищення експлуатаційних характеристик композитів $\text{ZrO}_2\text{--WC}$ обумовлено не лише сумарним внеском фазових складових, а й специфікою міжфазної взаємодії на нанорівні. Формування щільного міжфазного контакту між зернами діоксиду цирконію та карбіду вольфраму сприяє ефективному перерозподілу напружень у процесі навантаження, що зменшує локалізацію пластичних деформацій і уповільнює зародження дефектів. Встановлено, що при оптимальному співвідношенні компонентів формується структура з високим ступенем когезійної міцності, що безпосередньо впливає на довговічність матеріалу в умовах циклічного навантаження.

Окрім цього, суттєву роль відіграє механізм дисипації енергії руйнування, який реалізується через трансформаційне зміцнення тетрагональної фази ZrO_2 . Під дією зовнішніх напружень відбувається локальне фазове перетворення з утворенням моноклінної модифікації, що супроводжується об'ємним розширенням і, як наслідок, заклинюванням тріщини. У присутності твердих частинок WC цей ефект посилюється, оскільки вони виконують роль бар'єрів для поширення тріщин, формуючи складну траєкторію їх росту. Така мікромеханіка руйнування забезпечує поєднання високої твердості та достатньої тріщиностійкості, що є критичним для матеріалів, які працюють у важких умовах експлуатації.

Шляхом проведення системного аналізу фізико-технологічних чинників та оцінювання економічних параметрів обґрунтовано, що перспективним рішенням для потреб різних галузей економіки є впровадження наноструктурної кераміки системи $\text{ZrO}_2\text{--WC}$ із високими показниками механічної стабільності. Система $\text{ZrO}_2\text{--WC}$ поєднує в собі унікальну в'язкість руйнування діоксиду цирконію, що базується на механізмі трансформаційного зміцнення, та екстремальну твердість карбіду вольфраму.

Аналіз розробок дозволяє виділити такі ключові характеристики:

- механічна міцність та тріщиностійкість: введення WC як другої фази (у концентрації 15–30 %) створює жорсткий каркас, який стримує розвиток мікротріщин у матриці діоксиду цирконію. Ефект зміцнення підсилюється за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення фаз;

- зносостійкість в умовах інтенсивних навантажень: композити демонструють стабільну роботу в умовах сухого тертя, що збільшує ресурс вузлів у 2,5–3 рази порівняно зі стандартними сплавами. Це критично важливо для деталей тягового рухомого складу;

- термостійкість та фазова стабільність: матеріал зберігає фізико-механічні властивості при значних термічних перепадах, що дозволяє використовувати його в енергоефективних вузлах промислового обладнання та системах металообробки.

Важливим аспектом є також вплив мікроструктурної однорідності на трибологічні характеристики композиту. Дослідження показують, що зменшення розміру зерен до нанорівня сприяє формуванню більш стабільної контактної поверхні під час тертя, що знижує інтенсивність адгезійного зносу та запобігає утворенню вторинних тріщин. При цьому наявність WC забезпечує підвищену опірність абразивному зношуванню, тоді як матриця ZrO_2 компенсує крихкість системи за рахунок енергопоглинаючих механізмів. Синергетичний ефект цих факторів визначає високі експлуатаційні характеристики матеріалу в умовах змінних навантажень і температур.

Основним технологічним фактором, що визначає якість нанокompозиту, є метод синтезу. Встановлено, що використання методу електроконсолідації [1–5] дозволяє

зберегти наноструктурний стан матеріалу (у межах 60–90 нм). Це досягається завдяки надшвидкому нагріванню та прикладанню високого тиску одночасно з пропусканням електричного струму, що мінімізує ріст зерна та запобігає небажаним фазовим перетворенням.

До основних факторів експлуатаційного та технологічного впливу відносяться:

- дисперсність вихідної сировини: перехід до нанорозмірних порошків дозволяє отримати безпористу структуру з рівномірним розподілом фаз;
- режими електроконсолідації: температура та швидкість охолодження безпосередньо впливають на стабільність тетрагональної фази діоксиду цирконію;
- експлуатаційні чинники: наявність агресивних середовищ та циклічність навантажень вимагають прецизійного налаштування хімічного складу композиту для запобігання передчасної деградації поверхні.

Висновки. Системний аналіз підтверджує, що впровадження нанокompозитної кераміки $\text{ZrO}_2\text{--WC}$, синтезованої методом електроконсолідації, є обґрунтованим шляхом підвищення надійності транспортних систем та промислових об'єктів України. Поєднання високої в'язкості діоксиду цирконію з твердістю карбіду вольфраму дає змогу створювати матеріали, стійкі до інтенсивного кавітаційного та абразивного зносу. Оптимізація режимів швидкісного спікання під тиском забезпечує збереження наноструктурного стану фаз (60–90 нм), що дозволяє отримати твердість до 19 ГПа та робочу температуру до 950 °С. Це гарантує збільшення міжремонтного ресурсу критичних вузлів у 2,5–3 рази порівняно з традиційними твердими сплавами. Отримані результати мають практичну цінність для машинобудування і можуть бути інтегровані у виробничі плани для покращення характеристик продукції, що є економічно доцільним при відновленні промислових потужностей держави. Застосування імітаційного моделювання у поєднанні з методами електроконсолідації відповідає вимогам Smart Industry та створює умови для випуску енергоефективних складників, що сприятиме зміцненню технологічної незалежності України в післявоєнний період.

Перелік посилань

1. Hevorkian E., Samociuk W., Rucki M., Krzysiak Z., Pieniak D., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Lytovchenko S., Chalko L., Morozow D., Caban J., Kulich V. Microstructure and properties of binderless μWC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*. 2025. Vol. 18, Iss. 20. 4646. <https://doi.org/10.3390/ma18204646>.
2. 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. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>.
3. Hevorkian E. S., Nerubatskyi V. P., Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Prokopiv M. M., Samociuk W., Mechnik V. A. Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, Iss. 5. P. 364–375. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
4. Nerubatskyi V. P., Vovk R. V., Gzik-Szumiaty M., Gevorkyan E. S. Investigation of the effect of silicon carbide nanoadditives on the structure and properties of microfine corundum during electroconsolidation. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, No. 4. P. 540–546. <https://doi.org/10.1063/10.0017596>.
5. Morozova O. M., Martyrosyan S. R., Nerubatskyi V. P. The determination of the dependence of mechanical characteristics of $\text{ZrO}_2\text{--}3\text{ wt\% Y}_2\text{O}_3$ on the sintering mode of ceramics moulding by electroconsolidation method. Матеріали 4-ї міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, УкрДУЗТ, 27–28 листопада 2023 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 329–330.