

контактних напружень. В азотованому шарі виникають залишкові напруження стискання, величина яких на поверхні за літературними даними складає 600 – 700 МПа. Це підвищує границю витривалості на 30 – 40 % і переносе осередок втомного руйнування під азотований шар [2].

### Висновки

Таким чином, комплексний підхід забезпечує високий рівень експлуатаційних властивостей колінчастого валу з високоміцного чавуну з кулястим графітом.

### Література

1. **Волощенко С. М.** Створення наукових засад структуроутворення в чавуні для підвищення зносостійкості змінних деталей сільгосптехніки та транспорту : дис. ... д-ра техн. наук : 05.16.02. Київ, 2017. 236 с.
2. **Hasegawa T., Narita H.** A Study on Finished Surface Roughness of a Nitriding Spheroidal Graphite Cast Iron. *Proceedings of International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st century (LEM21)*. 2017. Vol. 9. 151. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmelem.2017.9.151>.

УДК 621.313:006.91

## МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ТА АНАЛІЗ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ $ZrO_2-WC$ І $ZrO_2-SiC$ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

**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 Анна 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

Сучасні тенденції розвитку транспортного машинобудування характеризуються постійним зростанням вимог до ефективності, надійності та довговічності рухомого складу. У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження інноваційних конструкційних матеріалів, які здатні витримувати складні

експлуатаційні умови та стабільно функціонувати навіть за наявності екстремальних механічних, термічних та динамічних навантажень. Особливо це стосується тягових електричних двигунів локомотивів, які є ключовими компонентами енергетичної системи залізничного транспорту. Надійність їх роботи безпосередньо впливає на ефективність перевезень, економічність експлуатації локомотивів та безпеку руху пасажирських і вантажних поїздів [1].

Найбільш уразливими вузлами у конструкції тягових двигунів є механізми тертя, підшипникові вузли, а також елементи передачі крутного моменту, які піддаються значним циклічним та абразивним навантаженням. Традиційні металеві сплави, що широко використовуються для виготовлення цих елементів, часто демонструють обмежену стійкість до зносу, корозії та втомних руйнувань, що зумовлює потребу у частому технічному обслуговуванні та заміні деталей. Це, у свою чергу, підвищує експлуатаційні витрати і знижує загальну надійність рухомого складу.

Сучасні наукові дослідження спрямовані на розробку та впровадження високотехнологічних композитних матеріалів, здатних значно підвищити експлуатаційні характеристики тягових електродвигунів. особливий інтерес представляють композити на основі діоксиду цирконію ( $ZrO_2$ ), які мають високу твердість, зносостійкість та термостійкість, а також здатні витримувати великі механічні навантаження без суттєвої деградації властивостей. Використання таких матеріалів у критичних вузлах двигунів відкриває перспективи значного подовження терміну служби компонентів, зниження частоти ремонту та підвищення надійності експлуатації локомотива у цілому.

Унікальність  $ZrO_2$  полягає в його здатності до трансформаційного зміцнення, що дозволяє матеріалу протидіяти поширенню магістральних тріщин [2–4]. Додавання тугоплавких карбідів, таких як карбід вольфраму (WC) та карбід кремнію (SiC), дає змогу поєднати в одному матеріалі високу твердість, хімічну інертність та виняткову в'язкість руйнування [5–7]. Реалізація таких властивостей вимагає не лише новітніх методів спікання, а й суворого метрологічного супроводу для забезпечення точності геометричних параметрів та стабільності фазового складу на нанорівні. Для розробки композитів високої щільності застосовується метод електроконсолідації [8, 9], який дозволяє контролювати кінетику ущільнення з високою точністю. Метрологічний контроль процесу базується на безперервному моніторингу температури та тиску, що мінімізує похибку при формуванні дрібнозернистої структури.

Ключовим показником надійності матеріалу є в'язкість руйнування ( $K_{1C}$ ), яка визначає здатність вузла тягових електричних двигунів протистояти раптовому руйнуванню. Метрологічна оцінка цього параметра проводиться за методом індентування (метод Палмквіста) з використанням розрахункової моделі Касвілла–Еванса:

$$K_{1C} = 0,016 \cdot (E/H)^{0,5} \cdot (P/c)^{1,5},$$

де  $E$  – модуль Юнга, ГПа;  $H$  – твердість за Віккерсом, ГПа;  $P$  – навантаження на індентор, Н;  $c$  – напівдовжина тріщини, що виходить з кута відбитка, м.

Дослідження показують, що оптимальний вміст  $ZrO_2$  у твёрдосплавній матриці WC–Co становить 6 мас.%. Це забезпечує максимальний приріст міцності. Порівняльні характеристики матеріалів, отримані в результаті прецизійних вимірювань, наведено в таблиці.

Таблиця – Фізико-механічні характеристики композиційних матеріалів

Склад матеріалу	Відносна щільність, %	Мікротвердість, ГПа	Міцність на згин, МПа	В'язкість руйнування, МПа·м <sup>0,5</sup>
Чиста матриця WC–Co	94,8	15,2	1935	11,5
Композит $ZrO_2$ –WC (6 %)	99,0	17,8	2660	16,2
Композит $ZrO_2$ –SiC (submicron)	99,4	14,5	609	8,4
Кераміка $ZrO_2$ (стабілізована $CeO_2$ )	99,8	12,0	580	10,2

Використання композитів системи  $ZrO_2$ –SiC характеризується високою термічною стабільністю [10, 11]. Метрологічне підтвердження фазової стабільності методом рентгеноструктурного аналізу свідчить про збереження тетрагональної фази навіть після багаторазових циклах нагріву, що характерно для режимів роботи тягових електричних двигунів при частих пусках та гальмуваннях. Введення SiC сприяє утворенню міжкристалічних зв'язків, які знижують швидкість зношування поверхонь тертя в умовах граничного змащування [12, 13].

Особлива увага приділяється метрологічному забезпеченню якості обробки поверхонь. Оскільки наноструктурні композити мають високу твердість, контроль шорсткості після фінішної обробки є критичним для забезпечення мінімального коефіцієнта тертя в підшипникових вузлах.

Застосування композиційних матеріалів на основі  $ZrO_2$  із добавками WC та SiC є науково обґрунтованим підходом до радикального підвищення експлуатаційної надійності тягового електрообладнання [14]. Завдяки реалізації механізму трансформаційного зміцнення та досягненню високої щільності методом електроконсолідації, вдалося отримати матеріали з міцністю на стиск до 5600 МПа та значно підвищеною в'язкістю руйнування.

Таким чином, метрологічна складова досліджень забезпечує високу достовірність отриманих даних, що дозволяє прогнозувати ресурс деталей тягових електричних двигунів з високою точністю. Впровадження таких матеріалів у конструкції локомотивів дозволить не лише збільшити міжремонтні терміни, а й зменшити витрати на технічне обслуговування за рахунок виключення раптових відмов крихкого характеру. Перспективи подальшого

розвитку напрямку полягають у створенні гібридних вузлів, де поєднуються електроізоляційні властивості  $ZrO_2-SiC$  з надвисокою зносостійкістю  $ZrO_2-WC$ , що забезпечить комплексний захист тягових систем у довгостроковій перспективі.

### Література

1. **Nerubatskyi V. P.** Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Т. 30, № 4. С. 3–21. DOI: <https://doi.org/10.18664/iksz.v30i4.351425>.
2. **Nerubatskyi V. P. et al.** Investigation of phase and structural states in nanocrystalline powders based on zirconium dioxide. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, no. 11. P. 1277–1282. DOI: <https://doi.org/10.1063/10.0021374>.
3. **Jiang W. et al.** Toughening cemented carbides by phase transformation of zirconia. *Materials & Design*. 2021. Vol. 202. 109559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109559>.
4. **Hevorkian E. S. et al.** Comparative qualitative analysis of hot pressing of zirconium dioxide nanopowders. *Functional Materials*. 2025. Vol. 32, no. 1. P. 134–145. DOI: <https://doi.org/10.15407/fm32.01.134>.
5. **Zhang Z. et al.** SiC whisker toughened WC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> binderless cemented carbides via fast-hot-pressed sintering and DFT calculations. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50, iss. 16. P. 27749–27757. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.05.073>.
6. **Ratov B. T. et al.** Effect of the ZrO<sub>2</sub> 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>.
7. **Ratov B. T. et al.** Features structure of the Cdiamond-(WC-Co)-ZrO<sub>2</sub> 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>.
8. **Hevorkian E. S. et al.** Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, no. 1. P. 100–113. DOI: <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>.
9. **Hevorkian E. S. et al.** 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. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.
10. **Mu Y. et al.** High-temperature-resistant ZrO<sub>2</sub> coating with SiC-whisker-enhanced interfacial bonding strength and improved emissivity for flexible silica fibre fabric. *Ceramics International*. 2023. Vol. 49, iss. 4. P. 6825–6833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.276>.
11. **Zhang B. et al.** Flexible and high-temperature resistant ZrO<sub>2</sub>/SiC-based nanofiber membranes for high temperature thermal insulation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 872. 159618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159618>.
12. **Zhang W.** Tribology of SiC ceramics under lubrication: Features, developments, and perspectives. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2022. Vol. 26, iss. 4. 101000. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2022.101000>.
13. **Yadav M. et al.** Synergistic evaluation of wear behaviour and microstructure in SiC/ZrO<sub>2</sub>-aluminium metal matrix composites (AMMCs): Vacuum controlled sintering process. *Vacuum*. 2025. Vol. 239. 114433. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.114433>.
14. **Геворкян Е. С. та ін.** Наноструктуровані керамічні композити на основі SiC, ZrO<sub>2</sub> та WC для підвищення надійності та метрологічної стабільності транспортних систем. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доп. 6-ї МНТК (Харків, 24–26 листоп. 2025 р.)*. Харків : УкрДУЗТ, 2025. С. 281–284.