

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет залізничного транспорту



ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

VI МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

ПРОГРАМА КОНФЕРЕНЦІЇ



ITT2025

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ

**Тези доповідей 6-ої міжнародної
науково-технічної конференції**

«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ»

Харків 2025

6-а міжнародна науково-технічна конференція «Інтелектуальні транспортні технології», Харків, 24–26 листопада 2025 р.: Тези доповідей. – Харків: УкрДУЗТ, 2025. – 300 с.

Збірник містить тези доповідей науковців вищих навчальних закладів України та інших країн, підприємств транспортної та машинобудівної галузей за чотирьма напрямками: розвиток інтелектуальних технологій при управлінні транспортними системами; транспортні системи та логістика; інтелектуальне проектування та сервіс на транспорті; функціональні матеріали та технології при виготовленні та відновленні деталей транспортного призначення.

© Український державний університет
залізничного транспорту, 2025

УДК 620.1:621.7

**НАНОСТРУКТУРОВАНІ КЕРАМІЧНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ SIC,
ZRO₂ ТА WC ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА МЕТРОЛОГІЧНОЇ
СТАБІЛЬНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ**

**NANOSTRUCTURED CERAMIC COMPOSITES BASED ON SIC, ZRO₂
AND WC FOR ENHANCING THE RELIABILITY AND METROLOGICAL
STABILITY OF TRANSPORT SYSTEMS**

*д-р техн. наук Е.С. Геворкян, канд. техн. наук В.П. Нерубацький,
канд. техн. наук Г.Л. Комарова, канд. техн. наук Л.В. Волошина
Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)*

*Dr. Sc. E. S. Hevorkian, Cand. of Eng. Sci. V. P. Nerubatskyi,
Cand. of Eng. Sci. H. L. Komarova, Cand. of Eng. Sci. L. V. Voloshyna
Ukrainian State University of Railway Transport (Kharkiv)*

Сучасний розвиток транспортної галузі вимагає створення матеріалів із прогнозованими функціональними властивостями, високою зносостійкістю та стабільністю у складних експлуатаційних умовах. Одним із найперспективніших напрямів підвищення надійності елементів транспортних систем є використання наноструктурованих керамічних композитів, отриманих методами механохімічного синтезу та електроконсолідації [1, 2]. Такі матеріали поєднують високу міцність, тріщиностійкість, термостійкість і стабільність метрологічних параметрів, що робить їх придатними для використання у вимірювальних вузлах, сенсорних елементах, еталонних зразках та вузлах тертя транспортних засобів.

В основі сучасних підходів до створення нанокompозитів лежить поєднання методів органічної та неорганічної хімії, зокрема золь-гель технологій і механосинтезу, що сприяє спостереженню за утворенням фаз на молекулярному рівні [3]. Такі технології дозволяють отримувати високоефективні матеріали із заданими властивостями, що особливо важливо для транспортної метрології, де будь-які структурні неоднорідності можуть викликати похибки вимірювання або нестабільність чутливих елементів.

Серед досліджених систем найбільш перспективними є композити на основі карбіду кремнію (SiC), діоксиду цирконію (ZrO₂) і карбіду вольфраму (WC). Їх синтез здійснюється із застосуванням орґано-неорґанічного комплексу (–CH₃)–(SiO₂)_n, що утворюється в процесі механохімічної активації. Цей комплекс слугує нанореактором для низькотемпературного синтезу β-SiC, який формується вже на стадії подрібнення порошків із додаванням алкоксиду кремнію (Si(OC₂H₅)₄). Такі умови дозволяють здійснити синтез при знижених температурах і

забезпечують однорідність фазового складу, що суттєво впливає на метрологічну стабільність кінцевого матеріалу [4, 5].

Подальша консолідація порошкових композицій здійснюється методом гарячого пресування або електроконсолідації за температур 1200–1400 °С і тиску близько 30 МПа. Контроль температурного градієнта (до 400 К/хв) дозволяє уникнути перегріву та нерівномірного росту зерен, завдяки чому формується дрібнозерниста структура з нанопідсиленням β -SiC, що забезпечує високу міцність і тріщиностійкість. Зокрема, для композицій на основі SiC отримано міцність на згин понад 650 МПа і коефіцієнт тріщиностійкості 6,5–7,9 МПа·м^{0.5}, що у півтора рази перевищує показники звичайних карбідокремнієвих матеріалів. Особливу увагу приділено впливу нанодобавок WC та частково стабілізованого діоксиду цирконію ($ZrO_2-Y_2O_3$). Додавання 10–20 % WC забезпечує утворення зв'язаної наноструктури, у якій зерна цирконію рівномірно розподіляються у «хмарі» нанокарбиду вольфраму. Така мікроструктура підвищує щільність і міцність зразків (до 3200 МПа при мікротвердості 22–24 ГПа), а також сприяє поліпшенню теплопровідності до 35 Вт/м·К, що важливо для елементів транспортних систем, що працюють при циклічних теплових навантаженнях. Механохімічний синтез β -SiC у нанореакторах сприяє формуванню внутрішніх і міжзеренних наноструктур, які забезпечують самопідсилення матриць без необхідності введення додаткових армуючих фаз [6]. Це дозволяє мінімізувати пористість та отримати матеріали теоретичної густини навіть при нижчих температурах спікання. Крім того, відсутність силікатних прошарків між зернами наповнювача знижує коефіцієнт тертя (до 0,16–0,25) та підвищує стабільність при тривалому навантаженні, що є критично важливим для точних транспортних вимірювальних систем.

Вимірювання структури й властивостей зразків реалізовувалося за рахунок застосування методів РФА, атомно-силової та електронної мікроскопії, що забезпечило метрологічно достовірне визначення параметрів мікротвердості, густини та фазового складу. Використання вимірювальної машини Instron 300LX дозволило точно зафіксувати залежність міцності від концентрації нанодобавок і режимів гарячого пресування. Для нанокомпозитів $ZrO_2-Y_2O_3-10\%WC$ зафіксовано збільшення міцності на 25 % порівняно з базовими цирконієвими кераміками, що свідчить про ефективність механічного зв'язування нанофаз [7].

Отримані результати демонструють, що введення органо-неорганічних прекурсорів на основі силіцій-алкоксидів не лише знижує температуру синтезу β -SiC, а й забезпечує високу однорідність розподілу наноутворень, що критично важливо для метрологічних застосувань. Структурна стабільність таких композитів гарантує сталість їхніх фізико-механічних характеристик у широкому діапазоні температур і навантажень, що дає змогу використовувати їх як еталонні матеріали для калібрування сенсорів тиску, температури, навантаження та вібрації у транспортних системах.

Можливості практичного застосування створених нанокомпозитів включають використання їх для виготовлення функціональних компонентів вузлів тертя, підшипників, гальмівних систем, сопел та елементів двигунів, а

також компонентів вимірювальних систем високоточного транспорту. У системах інтелектуального контролю транспортних засобів такі матеріали можуть забезпечувати стабільність параметрів сенсорів при тривалому впливі механічних і теплових факторів, що безпосередньо впливає на точність вимірювань і безпеку експлуатації.

З метрологічної точки зору, наноструктуровані композити на основі SiC, WC і ZrO₂ характеризуються високою стабільністю фізико-механічних параметрів у процесі багаторазових термоциклів [8], що гарантує відтворюваність отриманих результатів у динамічних умовах експлуатації транспортних систем. Такі матеріали демонструють мінімальні відхилення розмірних, теплових і пружних характеристик, що знижує вплив зовнішніх термодинамічних факторів на метрологічну надійність вимірювальних каналів. Формування цих властивостей обумовлене стабільністю міжфазних меж і наноструктурованої матриці, які забезпечують рівномірний розподіл напружень, пригнічення мікротріщиноутворення та мінімізацію релаксаційних процесів, що є ключовими умовами забезпечення довготривалої метрологічної стабільності матеріалу.

Наукова новизна роботи полягає у використанні орґано-неорґанічних комплексів як середовища для низькотемпературного синтезу нанокристалічних фаз та визначенні кореляції між параметрами механохімічної активації та показниками міцності й тріщиностійкості готових матеріалів. Практична цінність полягає у можливості масштабного застосування таких композитів для виготовлення високоточних деталей транспортного призначення із заданими метрологічними властивостями.

Таким чином, розроблені наноструктуровані матеріали на основі SiC, ZrO₂ і WC відповідають сучасним вимогам до функціональних матеріалів транспортного машинобудування. Вони характеризуються поєднанням високої механічної міцності, стабільності розмірів, низької зношуваності та стабільних метрологічних параметрів. Їх впровадження у виробництво деталей транспортних систем сприятиме підвищенню енергоефективності, ресурсу роботи та надійності засобів інтелектуального контролю транспортних технологій.

[1] Krzysiak Z., Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Rucki M., Chyshkala V., Caban J., Mazur T. Peculiarities of the phase formation during electroconsolidation of Al₂O₃-SiO₂-ZrO₂ powders mixtures. *Materials*. 2022. Vol. 15, Issue 17. 6073. DOI: 10.3390/ma15176073.

[2] Nerubatskyi V. P., Vovk R. V., Gzik-Szumiat 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. DOI: 10.1063/10.0017596.

[3] Zhang L., Huang X., Liu L., Nasar N. K. A., Gu X., Davis T. P., Zheng X., Wang L., Qiao R. Fabrication of organic/inorganic nanocomposites: from traditional synthesis to additive manufacturing. *Advanced Materials*. 2025. Vol. 37, Iss. 37. 2505504. <https://doi.org/10.1002/adma.202505504>.

[4] Gevorkyan E., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Morozova O. Revealing specific features of structure formation in composites based on nanopowders of synthesized zirconium dioxide. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5, No. 12 (113). P. 6–19. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242503.

[5] Nerubatskyi V. P., Vovk R. V., Gevorkyan E. S., Hordiienko D. A., Nazyrov Z. F., Komarova H. L. 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: 10.1063/10.0021374.

- [6] Suchikova Y., Kovachov S., Bohdanov I., Kozlovskiy A. L., Zdorovets M. V., Popov A. I. Improvement of β -SiC synthesis technology on silicon substrate. *Technologies*. 2023. Vol. 11, Iss. 6. 152. <https://doi.org/10.3390/technologies11060152>.
- [7] Nerubatskyi V. P., Hevorkian E. S., Vovk R. V., Krzysiak Z., Komarova H. L. The influence of zirconium dioxide nanoadditives on the properties of mullite-corundum. *Low Temperature Physics*. 2024. Vol. 50, No. 7. P. 558–568. DOI: 10.1063/10.0026282.
- [8] Khan A., Abdelrazeq M. W., Mattli M. R., Yusuf M. M., Alashraf A., Matli P. R., Shakoor R. A. Structural and mechanical properties of Al-SiC-ZrO₂ nanocomposites fabricated by microwave sintering technique. *Crystals*. 2020. Vol. 10, Iss. 10. 904. <https://doi.org/10.3390/cryst10100904>.

УДК 621.791.75

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ
ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ
МОДИФІКУЮЧИХ ПРИСАДОК ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ
НАПЛАВЛЕННІ**

**INCREASING THE OPERATIONAL STABILITY OF RENEWABLE
COATINGS BY USING MODIFYING ADDITIVES IN ELECTRICAL SLAG
SURFACE TREATMENT**

доктор філософії А.В. Захаров

*Харківський державний професійно-педагогічний фаховий коледж
ім. В.І. Вернадського (м. Харків)*

PhD A.V. Zakharov

*V. I. Vernadskiy Kharkiv State Professional and Pedagogical Applied College
(Kharkiv)*

Інтенсивна експлуатація ґрунтообробних машин у абразивно-активному середовищі призводить до прискореного зношування робочих органів, зростання витрат на ремонт та простої техніки. Тому актуальним є підвищення ресурсу деталей за рахунок удосконалення технологій відновлення і зміцнення, зокрема електрошлакового наплавлення (ЕШН), яке забезпечує формування щільних, малодефектних покриттів із керованою мікроструктурою [1].

Метою роботи є підвищення експлуатаційної стійкості відновлювальних покриттів, отриманих методом ЕШН, за рахунок введення до складу порошкових дротів спеціально підібраних модифікуючих присадок та оптимізації режимів наплавлення. Для досягнення мети досліджено вплив складу й дисперсності модифікаторів, а також параметрів процесу (струм, напруга, швидкість подачі електрода, тепловкладення) на формування мікроструктури, фазового складу та експлуатаційних властивостей наплавленого шару [2].

У якості модифікуючих компонентів використано композиції на основі карбідів та оксидів, які сприяють утворенню в покритті дрібнодисперсних зміцнювальних фаз і гальмують ріст зерен матриці. Показано, що оптимальний гранулометричний склад присадок забезпечує їх рівномірний розподіл в об'ємі