

DOI:10.31653/smf51.2025.78-85

Отримана в редакції 12.10.2025

Прийнята до друку 24.10.2025

Фомін О.В.¹, Іванченко Д.А.², Мельник О.М.³,
Фоміна А.М.², Хаїров С.Д.¹

¹ Національний транспортний університет,

² Приазовський державний технічний університет,

³ Одеський національний морський університет

МАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ТЕНДЕНЦІЇ УДОСКОНАЛЕННЯ НЕСІВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Актуальність проведення науково-прикладного дослідження, присвяченого матеріалознавчим тенденціям удосконалення несівних елементів і систем енергозабезпечення транспорту, зумовлена низкою глобальних викликів і потреб сучасної інженерії та економіки. Швидкий розвиток транспортної галузі вимагає постійного підвищення її ефективності, надійності та екологічності. Основні проблеми, що стоять перед транспортним машинобудуванням, безпосередньо пов'язані з вибором і застосуванням інноваційних матеріалів. Підвищення енергоефективності є критично важливим завданням, яке тісно корелює зі зменшенням маси конструкцій. Кожен кілограм, усунений із маси транспортного засобу, прямо впливає на зниження споживання палива або електроенергії. Отже, матеріалознавство стає ключовою дисципліною у досягненні цього прогресу.

Сучасні несівні елементи, зокрема опори трюмних кришок, остови обладнання, анкерні зв'язки, вали, рами, кузови та осі, експлуатуються в умовах зростаючих навантажень і агресивних середовищ. Це вимагає від матеріалів високої втомної міцності, корозійної стійкості та зносостійкості. Традиційні метали та сплави часто досягли меж своїх можливостей без суттєвого збільшення маси. Саме тому широке впровадження легких високоміцних матеріалів, таких як композити на полімерній та металевій матрицях, набуває стратегічного значення. Використання композиційних матеріалів дозволяє досягти унікального поєднання міцності, жорсткості та надзвичайно малої густини. Одночасно існує потреба в оптимізації процесів виробництва цих матеріалів для забезпечення їхньої економічної доцільності та серійності застосування.

Паралельно відбувається революційна трансформація систем енергозабезпечення транспорту, пов'язана з переходом на електричні, гібридні та водневі технології. Це створює нові матеріалознавчі виклики. Системи зберігання енергії, зокрема літій-іонні акумулятори, вимагають матеріалів з високою питомою енергією та потужністю, а також підвищеною термічною стабільністю та безпечністю. Матеріали електродів, електроліти та сепаратори є об'єктами інтенсивних досліджень для підвищення циклічного ресурсу та швидкості заряджання. Крім того, розробка паливних елементів на водні також залежить від нових каталізаторів, мембран і біполярних пластин. Ці елементи повинні бути ефективними, довговічними та мати доступну вартість.

Проведення цього науково-прикладного дослідження сприятиме формуванню науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору матеріалів та технологій для створення транспортних засобів нового покоління. Воно дозволить систематизувати світові матеріалознавчі тренди та адаптувати їх до вітчизняних промислових умов. Результати дослідження стануть основою для розробки нових стандартів і технічних регламентів, що підвищить якість і надійність транспортної техніки. У підсумку, вирішення матеріалознавчих завдань є ключовим фактором для переходу до сталого та високотехнологічного транспорту. Це дослідження безпосередньо відповідає державним пріоритетам інноваційного розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2] проведено експериментальне дослідження трибологічних характеристик наномасил, виготовлених на основі металевих оксидів. А також визначно вплив DLC-покриттів на мікроабразивне зношування титанових сплавів Ti-22Nb-6Zr, отриманих порошковою металургією. У дослідженні [3-5] автори розробили математичну модель енергетичних процесів у тягових системах підземного транспорту. Показано, що оптимізація ємності конденсаторних блоків забезпечує зменшення пікових навантажень і втрат енергії. Статті [6-9] аналізують: механізми виникнення струмових пробойів і ерозійних дефектів у підшипниках двигунів електромобілів; використання обвідного каналу вихлопних газів для зниження шкідливих викидів суднових дизелів; теплозахисні покриття (TBCs) для високотемпературних елементів машин [10-13]. У [14-16] визначено основні причини відмов паливних систем і способи їх запобігання та класифіковано існуючі підходи до оцінки ризиків і запропонували інтегровану систему контролю.

Дослідження [17-19] присвячені визначенню впливу покриттів на зносостійкість.

У статтях [20-22] розглянуто приклади використання адитивних процесів для зниження маси та підвищення ефективності вузлів транспортних засобів.

Проведений аналіз науково-технічної літератури підтверджує, що комплексному та інтегрованому вивченню матеріалознавчих тенденцій для одночасного удосконалення як несівних елементів, так і систем енергозабезпечення транспорту не приділено належної уваги.

Постановка завдання. Сучасний транспорт стикається з фундаментальною інженерною проблемою: необхідністю одночасного підвищення надійності, зниження маси несівних елементів і кардинального збільшення енергетичної ефективності. Існуючі матеріали та технології для несівних конструкцій часто не забезпечують необхідної питомої міцності та мають обмежений ресурс роботи в умовах високих циклічних навантажень. Це призводить до значної власної маси транспортних засобів, що негативно впливає на паливну/енергетичну економічність. Водночас, інтенсивний розвиток електротранспорту вимагає розробки нових матеріалів для акумуляторних систем, які мають високу питому енергію та безпечність, що є серйозним матеріалознавчим викликом. Проблема полягає у відсутності єдиної методології вибору та оптимізації матеріалів, яка б враховувала комплексні вимоги до структурної цілісності і енергетичної ефективності. Несприятливі наслідки такої роз'єднаності включають невиправдано високі експлуатаційні витрати та повільне впровадження екологічно чистих рішень. Таким чином, актуальною науково-прикладною проблемою є розробка наукових засад та технологічних рішень для інтегрованого матеріалознавчого удосконалення обох ключових систем транспорту.

Мета дослідження: наукове обґрунтування та розробка комплексу матеріалознавчих тенденцій і технологічних рішень для забезпечення суттєвого підвищення експлуатаційних характеристик несівних елементів та систем енергозабезпечення сучасного і перспективного транспорту.

Виклад основного матеріалу дослідження. Несівні конструкції транспортних засобів (остови, вали, опори, кузови, рами, стійки) визначають механічну стійкість та експлуатаційні характеристики об'єкта. Сучасні вимоги до зменшення маси й підвищення корозійної стійкості стимулюють застосування інноваційних матеріалів.

Легкі сплави та високоміцні сталі. Високоміцні мікролеговані сталі (BMC): Застосовуються сталі типів AHSS, TRIP, TWIP з граничною міцністю понад 1000 МПа, що дозволяють зменшувати товщину листа та забезпечувати високу пасивну безпеку (безпекова клітка). Сталі з гарячим штампуванням: Після обробки мають особливо високу міцність і використовуються для найвідповідальніших елементів (стійки даху, дверні балки). Алюмінієві сплави: тенденція полягає у розробці сплавів з вищою міцністю, поліпшеною корозійною стійкістю та здатністю до лиття під тиском для складних тонкостінних конструкцій (наприклад, у кузовах Audi A8, Tesla). Магнієві сплави: ще легші за алюмінієві; розробляються нові сплави (з додаванням рідкісноземельних металів) та технології захисту для застосування в критичних вузлах (колеса, картери).

Композиційні та гібридні матеріали. Полімерні композиційні матеріали (ПКМ): вуглепластик (CFRP) є "золотим стандартом" для легких і міцних конструкцій, а ключовою тенденцією є зниження вартості виробництва та підвищення швидкості виготовлення деталей (через технології автоматизованого укладання, RTM). Гібридні металокомпозитні структури: Поєднують локальні жорсткі зони з енергопоглинаючими шарами (наприклад, "метал-композит"), що дозволяє комбінувати переваги різних матеріалів. Металеві піни та сандвіч-панелі: Використання алюмінієвих або титанових пін як наповнювача створює дуже легкі та жорсткі елементи з відмінним поглинанням енергії, застосовуючись в аерокосмічній галузі та високо-технологічному транспорті.

Адитивні технології. 3D-друк (Адитивне виробництво): дозволяє створювати геометрії, неможливі для традиційних методів (наприклад, порожнисті структури з ґратчастими заповнювачами). Це дає змогу створювати несівні елементи зі змінною щільністю матеріалу та спрямованою текстурою волокон. Застосовується для друку легких кронштейнів та індивідуалізованих деталей.

Однією з ключових проблем експлуатації транспортних систем є втомне руйнування та знос поверхонь. Сучасні матеріалознавчі підходи передбачають модифікацію поверхневого шару. *Наноструктурування поверхневого шару:* використання лазерної, ультразвукової або плазмової обробки. Нанопокриття: впровадження тонких плівок та покриттів (наприклад, DLC – diamond-like carbon) на несівні та функціональні елементи. Зокрема, нано-DLC покриття істотно підвищує зносостійкість титанових сплавів. Термобар'єрні покриття

(TBCs): використовуються для захисту елементів високотемпературних двигунів, покращуючи їхню теплову ефективність та ресурс. Трибологічні дослідження також показують потенціал нанолубрикантів, де введення наночастинок значно знижує коефіцієнт тертя та знос поверхонь у парах тертя.

Революція в енергозабезпеченні транспорту вимагає розробки функціональних матеріалів з високою питомою енергією та потужністю. *Електрохімічні накопичувачі*. Літій-іонні (Li-ion) акумулятори: ключова тенденція – розробка нових матеріалів для електродів, електролітів та сепараторів з високою ємністю, питомою енергією (до 300 Вт·год/кг) та підвищеною термічною стабільністю та безпечністю. Твердотільні акумулятори (Solid-State Batteries): наймасштабніша тенденція. Заміна рідкого електроліту на твердий (керамічний або полімерний) значно підвищує безпеку, термічну стабільність і потенціал щільності енергії. *Накопичувачі потужності*. Суперконденсатори та гібридні накопичувачі: Вимагають матеріалів з високою питомою потужністю. Застосування нанопористих вуглецевих матеріалів та оптимізація конструкції та технологій намотування підвищує їхню ефективність для рекуперації енергії (наприклад, у метрополітені).

Водневі та термостійкі матеріали. Водневі паливні елементи: Удосконалення залежить від нових каталізаторів, мембран (протонообмінних) та біполярних пластин, які мають бути довговічними та доступними за вартістю. Термостійкі матеріали: для авіаційних двигунів та турбін розробляються монокристалічні нікелеві суперсплави та керамічні композитні матеріали (СМС). Це дозволяє підвищити робочу температуру та ККД двигуна, зменшуючи витрату палива.

Екологічні та ресурсозберігаючі аспекти. Одним із пріоритетів є екологічна безпечність і вторинна переробка матеріалів, що відповідає концепції замкненого циклу матеріалів (Circular Economy). Розробляються біополімерні композити з волокнами рослинного походження. Актуальними є дослідження матеріалів із вторинної сировини та розробка технологій рециклінгу. Зростає увага до регенераційних технологій відновлення сплавів та повторного використання вуглецевих волокон.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Сучасний розвиток транспорту визначається еволюцією матеріалознавства як базової наукової основи інновацій. Високоміцні сталі, алюмінієві та

композитні матеріали забезпечують оптимізацію масогабаритних параметрів несівних елементів.

Модифікація поверхонь нанопокриттями та лазерними технологіями значно підвищує зносостійкість і довговічність конструкцій, що є критичним для ключових несівних вузлів.

Нові матеріали для систем енергозабезпечення (Li-ion, твердотільні, суперконденсатори) сприяють розвитку гібридного та електричного транспорту, вимагаючи комплексного підходу до проектування конструкцій.

Проведене дослідження обґрунтовує доцільність переходу від традиційних металів до багатофункціональних композитних матеріалів та сприяє формуванню науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору матеріалів та технологій для створення транспортних засобів нового покоління.

Перелік використаних джерел

1. Jason, Y.J.J.; How, H.G.; Teoh, Y.H.; Chuah, H.G. A Study on the Tribological Performance of Nanolubricants. *Processes* 2020, *8*, 1372. <https://doi.org/10.3390/pr8111372>.

2. Gobbi, S.J.; Ferreira, J.L.d.A.; Araújo, J.A.; André, P.; Henriques, V.A.R.; Airolti, V.J.T.; Moreira da Silva, C.R. The Effect of DLC Surface Coatings on Microabrasive Wear of Ti-22Nb-6Zr Obtained by Powder Metallurgy. *Coatings* 2024, *14*, 1396. <https://doi.org/10.3390/coatings14111396>.

3. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies* 2018. 2/1(92). 63-71. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126080.

4. He, F., Xie, G.; Luo, J. Electrical bearing failures in electric vehicles. *Friction* 2020. *8*, 4–28. <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0356-5>.

5. Sagin S.V., Kuropyatnyk O.A. Using exhaust gas bypass for achieving the environmental performance of marine diesel engines. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. 7-8. 36-43. <https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-36-43>.

6. Bogdan, M.; Peter, I. A Comprehensive Understanding of Thermal Barrier Coatings (TBCs): Applications, Materials, Coating Design and

Failure Mechanisms. *Metals* 2024. 14. 575.
<https://doi.org/10.3390/met14050575>.

7. Sagin A.S., Zablotskyi Yu.V. Reliability maintenance of fuel equipment on marine and inland navigation vessels. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2021. 7-8. 14-17.
<https://doi.org/10.29013/AJT-21-7.8-14-17>.

8. Sagin S.V., Sagin S.S., Madey V. Analysis of methods of managing the environmental safety of the navigation passage of ships of maritime transport. *Technology Audit and Production Reserves* 2023. 4(3(72)). 33–42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286039>.

9. Volosova, M.A.; Lyakhovetsky, M.A.; Mitrofanov, A.P.; Melnik, Y.A.; Okunkova, A.A.; Fedorov, S.V. Influence of Cr-Al-Si-N and DLC-Si Thin Coatings on Wear Resistance of Titanium Alloy Samples with Different Surface Conditions. *Coatings* 2023. 13. 1581.
<https://doi.org/10.3390/coatings13091581>.

10. Sulim A.O., Fomin O.V., Khozya P.O., Mastepan A.. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University* 2018.5(1). 79-87. DOI: 10.29202/nvngu/2018-5/8.

11. Metel, A.; Sotova, C.; Fyodorov, S.; Zhylynski, V.; Chayeuski, V.; Milovich, F.; Seleznev, A.; Bublikov, Y.; Makarevich, K.; Vereschaka, A. Improving the Wear and Corrosion Resistance of Titanium Alloy Parts via the Deposition of DLC *Coatings*. 2024, 10, 106.
<https://doi.org/10.3390/c10040106>.

12. Fomin, O.; Lovska, A.; Kučera, P.; Pištěk, V. Substantiation of Improvements for the Bearing Structure of an Open Car to Provide a Higher Security during Rail/Sea Transportation. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 873. <https://doi.org/10.3390/jmse9080873>.

13. Melnyk O., Bulgakov M., Fomin O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Pulyaev I. Sustainable development of renewable energy in shipping: Technological and environmental prospects. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport* 2025. 127. 165–188. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2025.127.10>.

14. Sagin, S.; Sagin, A.; Zablotskyi, Y.; Fomin, O.; Pištěk, V.; Kučera, P. Method for Maintaining Technical Condition of Marine Diesel Engine Bearings. *Lubricants* 2025, 13, 146.
<https://doi.org/10.3390/lubricants13040146>.

15. Kučera, O.; Pištěk, V.; Fomin, O.; Kučera, P.; Sagin, S. Measuring Device for More Precise Mistuning Identification of Integrated

Bladed Discs. *Symmetry* 2025, 17, 717.
<https://doi.org/10.3390/sym17050717>.

16. Hamisa, A.H.; Azmi, W.H.; Ismail, M.F.; Rahim, R.A.; Ali, H.M. Tribology Performance of Polyol-Ester Based TiO_2 , SiO_2 , and Their Hybrid Nanolubricants. *Lubricants* 2023, 11, 18.
<https://doi.org/10.3390/lubricants11010018>.

17. Sagin, S.; Madey, V.; Sagin, A.; Stoliaryk, T.; Fomin, O.; Kučera, P. Ensuring Reliable and Safe Operation of Trunk Diesel Engines of Marine Transport Vessels. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1373.
<https://doi.org/10.3390/jmse10101373>.

18. Sarzyński, B.; Śniezek, L.; Grzelak, K. Metal Additive Manufacturing (MAM) Applications in Production of Vehicle Parts and Components – A Review. *Metals* 2024, 14, 195.
<https://doi.org/10.3390/met14020195>.

19. Sagin, S.V.; Karianskyi, S.; Sagin, S.S.; Volkov, O.; Zablotskyi, Y.; Fomin, O.; Píšťek, V.; Kučera, P. Ensuring the safety of maritime transportation of drilling fluids by platform supply-class vessel. *Appl. Ocean Res.* 2023, 140, 103745.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103745>.

20. Jia, D., Li, F., Zhang, Y. 3D-printing process design of lattice compressor impeller based on residual stress and deformation. *Sci. Rep.* 2020, 10, 600. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57131-1>.

21. Zablotsky, Y.V.; Sagin, S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines. *Indian J. Sci. Technol.* 2016, 9, 208–216. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i20/94490>.

22. Gerlici, J.; Lovska, A.; Fomin, O.; Dižo, J.; Blatnický, M. Strength Analysis of an Open Car Body with Honeycomb Elements during Ro-Ro Transportation. *Appl. Sci.* 2023, 13, 11022.
<https://doi.org/10.3390/app131911022>.