

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.33.083: 621.892.8

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.260

ІННОВАЦІЙНІ ПРИСАДКИ ДО МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ АВТОМОБІЛІВОлішевська В. Є., Абрамчук Ф. І., Олішевський Г. С., Іванова Г. П., Гаєк Є. А.
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Анотація. У роботі розглянуто й систематизовано присадки до мастильних матеріалів на основі нанометалів, нановуглецю, нанокомпозитів для безрозбірного ремонту автомобілів. Проаналізовано дисперсійну стабільність присадок. Узагальнено механізми змащування мастильними матеріалами з інноваційними присадками.

Ключові слова: наноматеріали, інноваційні присадки, дисперсійна стабільність, трибологічні властивості, механізм змащування, безрозбірний ремонт.

Вступ

Надійність і довговічність сучасних автомобілів не залишаються сталими протягом терміну експлуатації, оскільки відбуваються різні процеси, які викликають зношування деталей, накопичення результатів явищ корозії, втомленості матеріалів тощо. Основною причиною, що впливає на надійність і довговічність, є зношування деталей, вузлів, агрегатів та систем автомобіля, що виражається в руйнуванні поверхонь сполучених деталей, порушенні їх первісних геометричних форм, об'ємів, ваг [1–3].

Наслідком зношування деталей, вузлів, агрегатів і систем автомобіля є порушення трибосполучень, кінематичних зв'язків та роботи всього об'єкта загалом [1, 2].

Значення проблеми зносу та її масштаби визначають такі показники: у типовому легковому автомобілі приблизно 79 % енергії витрачається на подолання тертя та втрати; витрати на подолання тертя поглинають до третини енергії, що виробляється у світі; через знос вузлів трибосполучень відбувається до 80 % механічних поломок [2, 4].

Зміна технічного стану автомобілів унаслідок тертя призводить до зростання питомих витрат на запасні частини, технічне обслуговування та ремонт [2, 3]. У ремонтних роботах, які погано піддаються механізації та автоматизації, залучена приблизно десята частина робочої сили високої кваліфікації.

Проблеми зносу деталей автомобілів вирішуються за допомогою застосування мастильних матеріалів, які містять традиційні присадки (органічні фосфати, органічні сульфіді, органічні металеві сполуки тощо) [5, 6].

Одним із перспективних способів розв'язання питання зносу деталей автомобілів в

умовах економічної кризи й дефіциту ресурсів є нові інноваційні присадки до мастильних матеріалів, а дослідження складу й властивостей присадок є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз публікацій

Основною функцією автомобільних мастильних матеріалів є зменшення тертя й зношування деталей. Крім того, мастильні матеріали мають забезпечувати охолодження та очищення зони тертя від продуктів зносу [5, 6].

Якість мастильних матеріалів забезпечується використанням присадок – хімічних сполук, що додаються в мастильні матеріали для підсилення природних властивостей або надання спеціальних властивостей [7].

За призначенням виокремлюють такі типи присадок (ДСТУ 3437-96): в'язкісні, протизношувальні та протизадирні, депресорні, протиокисні, антикорозійні, протипінні, мийні, поліфункціональні присадки, пакет присадок [7].

Присадки мають хороші трибологічні властивості, ефективно зменшують знос деталей автомобілів, але є й недоліки їх використання, серед яких можна назвати можливість спричинення хімічної корозії, токсичність, вивільнення сульфатної золи, фосфору та сірки, забруднення повітря [4–6].

Розвиток автомобільного транспорту висунув нові вимоги до якості мастильних матеріалів і викликав необхідність використання нових присадок.

Перспективними інноваційними присадками, що додаються в мастильні матеріали для експлуатації та ремонту автомобілів, є наноприсадки, які мають нові трибологічні властивості.

До наноматеріалів належать ті, що мають нанометровий масштаб розмірів хоча б в одному з трьох вимірів [8–11].

Наноматеріали можуть перебувати в різних агрегатних станах: твердому, рідкому або газоподібному – залежно від способу отримання, структури й призначення.

На практиці найбільш поширеними є твердотільні наноматеріали. Наноматеріали в твердому стані мають розмір структурних елементів до 100 нм. Їх властивості:

- поява нетрадиційних видів симетрії структури й особливих видів з'єднань меж поділу фаз;

- провідна роль процесів самоорганізації в структуроутворенні;

- висока каталітична активність поверхні наночастинок та їх ансамблів;

- особливий характер протікання процесів передачі енергії, заряду, що відрізняються низьким споживанням енергії, високою швидкістю й синергетичними ознаками [8–11].

Основними причинами проявів таких властивостей наноматеріалів є:

- висока питома поверхня й пов'язана з нею підвищена енергетична активність наночастинок;

- вирішальна роль розмірних ефектів, що проявляється як в індивідуальних наночастинках, так і в їх ансамблях – через значну протяжність меж поділу [8–11].

Усе це проявляється в механізмах упорядкування, властивостях наночастинок та їх ансамблів, у закономірностях різних процесів.

Основними властивостями наноматеріалів в твердому стані є:

- висока міцність, твердість, зносостійкість;
- змінені електричні, теплові, оптичні показники.

Нині активно розробляються наноматеріали, які мають унікальні властивості, наприклад високу міцність, малу густину й велику зносостійкість [8–12].

Приклади наноматеріалів у твердому стані:

- нанопорошки (оксиди металів, карбіди, нітриди тощо);

- нанокристали й наночастинки;

- наноплівки, нанопилюшки;

- нанокомпозити;

- наноструктуровані метали, кераміки, полімери.

Наноматеріали в твердому стані можуть застосовуватися як конструкційні матеріали, покриття, каталізатори, сенсори, наноприсадки та ін.

Газоподібні наноматеріали – це наночастинки, зважені в газовому середовищі. Використовуються для осадження плівок і нанопокриттів.

Наноматеріали застосовуються як мастильні та охолоджувальні рідини.

Прикладами наноматеріалів у стані рідини є мастильні наноматеріали з наночастинками графену, оксидів металів, фулерена тощо.

Важливими властивостями є:

- зменшення тертя й зносу;

- покращений теплоперенос.

Незважаючи на значну кількість наноматеріалів, наразі не існує єдиної класифікації наноприправок до автомобільних мастильних матеріалів.

Мета й постановка завдання

Метою є огляд і систематизація перспективних інноваційних присадок до мастильних матеріалів для експлуатації та ремонту автомобілів, а також аналіз сучасних тенденцій їх розвитку.

Для досягнення окресленої мети необхідно виконати такі завдання:

- розглянути склад і трибологічні властивості інноваційних присадок до мастильних матеріалів;

- проаналізувати дисперсійну стабільність присадок;

- узагальнити механізми змащування мастильними матеріалами з інноваційними присадками;

- дослідити можливості інноваційних наноприправок для безрозбірного ремонту автомобілів.

Методика

У роботі впроваджено такі методи: теоретичні дослідження (класифікація, систематизація), аналіз і узагальнення відомих наукових результатів, емпіричні методи (порівняння, спостереження).

Виклад основного матеріалу

Склад і трибологічні властивості інноваційних присадок до мастильних матеріалів. Належність присадок до наноматеріалів підтверджується такими ознаками:

- присадки мають у своєму складі нанорозмірні частинки – частинки, що мають протяжність хоча б в одному напрямку не більше ніж 100 нм (наприклад, сферичні частинки – фулерени, волокна політетрафторетиле-ну (ПТФЕ)) і мають нові властивості;

- компоненти присадок отримані за допомогою нанотехнологій;

- на поверхнях тертя формуються наноструктуровані захисні покриття.

Поки не існує єдиної класифікації наноприсадок до автомобільних мастильних матеріалів. Унаслідок аналізу вітчизняної та зарубіжної літератури з'ясовано, що можна розрізняти три основні типи наноприсадок до мастильних матеріалів залежно від хімічної природи наночастинок:

- на основі металів (металеві, оксидні, сульфідні тощо);
- на основі вуглецю (графен, нанотрубки, фулерен, наноалмази);
- нанокомпозитні системи [4, 13, 14].

До наноприсадок на основі металів належать чисті метали, їх оксиди, сульфідні, гідроксиди та солі:

- на основі чистих металів: Cu, Ag, Fe, Pd, Ni [4, 13, 14];
- на основі оксидів металів: CuO, ZnO, Al₂O₃, TiO₂, ZrO₂ [4, 14–17];
- на основі сульфідів: WS₂, MoS₂, CuS, ZnS [17–23];
- на основі гідроксидів La(OH)₃ [4];
- на основі солей металів: CaCO₃, LaF₃, ZrP, Ca₃(BO₃)₂, Zn₃(PO₄)₂ [4, 14].

Трибологічні властивості мастильних матеріалів покращують наноматеріали з низькою температурою плавлення, наприклад мідь (Cu), срібло (Ag) та сплав індій-олово (In-Sn) [4, 17, 24]. Також покращують трибологічні властивості мастильних матеріалів наночастинки Fe, Pd, Ni [4, 8–10].

Особливий інтерес становлять оксиди металів ZnO, TiO₂, ZrO₂, які забезпечують ефективне змащення вузлів тертя, а їх властивості тісно залежать від розміру частинок, твердості та концентрації [4, 14–17].

Сульфідні метали, наприклад MoS₂ та WS₂, здатні хімічно взаємодіяти з поверхнями тертя й утворювати стабільну адсорбційну плівку, яка забезпечує захист навіть за екстремальних умов [8–12]. Ультратонкі нанопластики MoS₂ мають вищі трибологічні властивості, ніж інші сульфідні метали, оскільки легше проникають у контактну зону.

Хоча наноматеріали на основі сульфідів металів, як-от MoS₂ та WS₂, демонструють гарні антифрикційні та протизношувальні властивості серед усіх цих категорій, високий вміст сірки призводить до сильної корозії пар тертя й викликає екологічні проблеми [4, 14, 17].

Гідроксиди металів, наприклад, наночастинки La(OH)₃, які отримані золь-гель методом, завдяки своїм малим розмірам і високій хімічній активності забезпечують значне зниження тертя в умовах граничного змащення [4].

Перспективними інноваційними присадками до автомобільних мастильних матеріалів є солі металів, наприклад, CaCO₃, LaF₃, ZrP, Ca₃(BO₃)₂, Zn₃(PO₄)₂ [4]. Так, наночастинки CaCO₃ сприяють утворенню захисної трибоплівки на поверхнях тертя, що суттєво знижує знос деталей, а додавання нанопластинок α -ZrP зменшує коефіцієнт тертя на 65 % порівняно з мінеральною оливою [4].

Перспективними трибологічними матеріалами є вуглецеві наноматеріали, які визначаються хімічною стабільністю, високою міцністю і екологічністю [8–11]. До цієї групи належать наноматеріали:

- на основі чистого вуглецю (наноалмази, фулерени, вуглецеві нанотрубки, графен) [4, 8–11, 17, 25–27];
- на основі полімерів PTFE, PSS [4, 28].

Залежно від розмірності структури виокремлюють такі типи наноматеріалів:

- 0D (нульвимірні, або точкові, мають всі три розміри в нанометровому діапазоні): вуглецеві квантові точки (CQD), наноалмази, фулерен C₆₀;
- 1D (одновимірні, або лінійні, мають два розміри в нанометровому діапазоні, один розмір – у макроскопічному діапазоні): вуглецеві нанотрубки (CNT);
- 2D (двовимірні, або площинні, мають один розмір в нанометровому діапазоні, два розміри – в макроскопічному діапазоні): графен;
- 3D (тривимірні, або об'ємні, всі розміри виходять за межі нанометрового масштабу, але можуть містити наноструктурні елементи): графіт [8–11, 29].

Порівняння властивостей наноалмазів і фулеренів продемонструвало, що фулерени забезпечують кращу зносостійкість, ніж наноалмази, а поверхнево модифіковані вуглецеві нанотрубки добре диспергуються в оливах і утворюють на поверхнях деталей «молекулярні щітки», які діють як мікропідшипники [4, 8–11].

Графен – 2D-наноматеріал, що забезпечує самозмащувальний ефект (ультранизьке тертя, суперзмащення), надзвичайну зносостійкість і екологічні властивості [8–11, 14, 17, 30].

Графен як наноприсадку до мастильних матеріалів уперше дослідив Берман 2011 р.

Якість і мастильні властивості графену визначають методи його отримання (механічне або хімічне розшарування, термічне відновлення графіту) [4, 8–11].

Додавання багат шарового графену до мастильних матеріалів навіть у незначних кількостях зменшує коефіцієнт тертя вшес-

теро й знос – у 10 000 разів [4, 14, 17]. Ці результати дають змогу вважати графен перспективною інноваційною присадкою до мастильних матеріалів.

Крім наноматеріалів на основі чистого вуглецю, ефективно зменшують тертя полімерні наночастинки, на трибологічні властивості яких суттєво впливають розмір і форма наночастинок.

Високу змащувальну спроможність мають нанокompозитні присадки, що утворюють на поверхнях тертя композитну трибopлiвкy, у якій реалізується синергетичний ефект між різними компонентами.

Прикладами присадок до мастильних матеріалів на основі нанокompозитів є Cu@SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{@TiO}_2$, Cu@MoS_2 , G@MoS_2 , $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{@GO}$, $\text{FeS}_2\text{@G}$, Ag@G , Cu@GO , $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{@G}$, $\text{La}_2\text{O}_3\text{@PI}$, Alumina@MWCNTs (*Multi-Walled Carbon Nanotubes* – багатостінні вуглецеві нанотрубки) [31–33].

Нанокompозит Cu@SiO_2 має кращі трибологічні властивості порівняно з окремими наночастинами Cu і SiO_2 , нанокompозит $\text{Al}_2\text{O}_3\text{@TiO}_2$ демонструє кращі антифрикційні властивості, ніж чисті оксиди Al_2O_3 або TiO_2 [4, 31–33].

Зменшує знос деталей автомобілів додавання в мастильні матеріали нанотрубок SWCNTs (*Single-Walled Carbon Nanotubes*, одностінні вуглецеві нанотрубки).

Перспективним матеріалом для додавання до мастильних матеріалів є 2D-нанокompозити – композити з шаруватою структурою, наприклад, нанокompозити на основі MoS_2 та графену [8–12].

Найкращі трибологічні властивості нанокompозитів Cu@MoS_2 досягаються за концентрації нанокompозитів у мастильному матеріалі 0,5 % мас., за якою коефіцієнт тертя й ширина плями зносу зменшуються на 37,8 % і 28,5 % відповідно, порівняно з іншими присадками [31].

Дослідження композитів $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{@GO}$ продемонстрували, що трибологічні властивості нанокompозиту кращі, ніж у наночастинок Fe_2O_3 та нанолістів графену, а коефіцієнт тертя й діаметр плями зносу пар тертя можуть бути зменшені на 67 % і 70 % відповідно [4].

Перспективними є й інші нанокompозити на основі графену: $\text{FeS}_2\text{@G}$, Ag@G , Cu@GO , $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{@G}$, які також мають хороші антифрикційні та протизношувальні властивості [4, 33]. Наприклад, додавання 0,075 мас. % $\text{Mn}_3\text{O}_4\text{@G}$ дає змогу зменшувати коефіцієнт тертя та глибину зносу на 75 % та 97 % відповідно.

Дисперсійна стабільність присадок. Повний потенціал використання наночастинок як присадок до мастильних матеріалів був значно обмежений через недостатню міжфазну взаємодію між присадками й мастильними матеріалами. Наночастинки мають високі значення питомої поверхні, що призводить до збільшення міжмолекулярних сил, посилюючи цим агрегацію наночастинок [8–11].

До основних факторів, що впливають на дисперсійну стабільність наноприсадок, належать розмір, форма й концентрація присадок у мастильних матеріалах, а також властивість базових мастильних матеріалів.

Зменшення радіуса наночастинок призводить до підвищеної дисперсійної стабільності. Наприклад, менші наночастинки Ag (7 нм) демонструють кращу дисперсійну стабільність, ніж більші (50 нм). Однак зі зменшенням розміру частинок поверхнева енергія наночастинок зростає, і агрегація посилюється. Отже, використання малих наночастинок і запобігання агрегації необхідно брати до уваги одночасно [4].

Вплив форми наночастинок на стабільність дисперсії пов'язаний зі співвідношенням сторін (довжина / діаметр) наночастинок. Наночастинки з високим співвідношенням сторін частіше агломеруються. Це означає, що сферичні наночастинки демонструють кращу стабільність дисперсії, ніж ті, що мають стрижневу й трубчасту форму [4]. Наприклад, наночастинки фулерену C_{60} виявляють кращу стабільність дисперсії, ніж вуглецеві нанотрубки.

Висока концентрація робить наночастинки ближчими одна до одної та збільшує сили тяжіння Ван-дер-Ваальса, тому наночастинки легко агломеруються за високих концентрацій. Котія та ін. [34] провели експерименти щодо дисперсійної стабільності наночастинок Al_2O_3 в трансмісійній оливі за різних концентрацій (0,5 об. %, 1,0 об. %, 1,5 об. %, 2,0 об. %) і виявили, що суспензія з найнижчою концентрацією (0,5 об. %) була найбільш стабільною за часом.

Важливу роль у дисперсійній стабільності має властивість базових мастильних матеріалів (рН). Оптимальне значення рН може запобігати агрегації наночастинок, підвищуючи цим стабільність дисперсії.

Механізми змащування мастильними матеріалами з інноваційними присадками. Механізми змащування наночастинок можна поділити на такі типи: формування трибopлiвкy, ефект підшипника кочення, трансфор-

мація мікроструктури, синергетичний ефект та ефект відновлення поверхні [4].

1. Формування трибоплівки. Через високі значення питомої площі поверхні та поверхневої енергії наночастинки легко формують захисну плівку на контактних поверхнях деталей унаслідок адсорбції або хімічних реакцій.

Наноприсидаки можуть утворювати фізичну адсорбційну плівку, а наночастинки, що містять полярні атоми, здатні утворювати більш стабільну хімічну трибоплівку, яка досягається внаслідок трибохімічної реакції під час тертя. Фізична або хімічна плівка утворюється залежно від типу наночастинок і умов: температури, тиску, середовища. Суттєво впливає на формування плівки полярність молекул.

Формування трибоплівки відіграє важливу роль у змащуванні й дає змогу зменшити прямі контакти метал-метал, знизити коефіцієнт тертя, запобігати зношуванню й мікропошкодженням.

Прикладами інноваційних присадок, які можуть утворювати стабільну плівку на металевих поверхнях деталей і значно покращувати трибологічні властивості мастильного матеріалу, є наночастинки оксиду титану (TiO_2), графен.

2. Ефект підшипника кочення. Наночастинки сферичної форми (наприклад, SiO_2 , WS_2) можуть котитися між нерівностями поверхонь тертя, що перетворює тертя ковзання на тертя кочення. Ефект підшипника кочення посилюється зі збільшенням розміру наночастинок. Важливим фактором, що впливає на механізми змащування, є товщина плівки, а ефект підшипника кочення може бути домінантним механізмом змащування, коли товщина плівки наближається до розміру наночастинок.

3. Трансформація мікроструктури. Важливою особливістю наночастинок (наприклад, вуглецевих нанотрубок, графену, нанодіамантів тощо) є мікроструктура, яка визначає їх фізико-механічні й трибологічні властивості. В умовах високого тиску й температури під час тертя структура наноматеріалів може руйнуватися, перебудовуватися та створювати нову мікроструктуру.

Основні особливості процесів:

- руйнування первинної структури (під дією навантаження і температур наночастинки можуть втрачати свою кристалічну або трубчасту структуру);

- формування нової мікроструктури (виникають нові фази або аморфні утворення,

що можуть мати кращі змащувальні властивості);

- адаптація до умов тертя (трансформація дає змогу наночастинкам більш ефективно взаємодіяти з поверхнями тертя деталей, знижуючи тертя та зношування);

- покращення захисних властивостей (новоутворена мікроструктура може більш міцно зчеплюватися з поверхнями тертя, створюючи стабільні захисні плівки).

Наприклад: під час роботи двигуна, наночастинки графену можуть трансформуватися в багатошарові структури, які діють як самовідновлювальні змащувальні шари.

4. Синергетичний ефект. Наноприсидаки під час тертя взаємодіють з мастильними оливами та модифікованими поверхнями тертя, що викликає синергетичний ефект.

Синергетичний ефект може виникати внаслідок взаємодії наноприсидак з мастильними матеріалами (наприклад, наночастинок срібла і мастильного матеріалу), взаємодії хімічних сполук (наприклад, в нанокompозитах $\text{Al}_2\text{O}_3@(\text{SiO}_2)$), а також у процесі взаємодії між наноприсидаками та модифікованими поверхнями тертя способом певних оброблень поверхні, таких як азотування, покриття та текстурування.

5. Ефект відновлення поверхні. Поверхні тертя, як правило, гладкі, а в процесі граничного змащування поверхні деталей в окремих точках можуть безпосередньо контактувати одна з одною, що призводить до високого коефіцієнта тертя та швидкості зношування. Дослідження антифрикційних і протизношувальних властивостей наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 в моторній оливі показали, що високий тиск і температура під час тертя сприяли спіканню наночастинок на поверхнях і ремонтували шрами та канавки, що призвело до покращення трибологічних властивостей [34].

Ефект ремонту поверхонь тертя спостерігався в дослідженнях наноприсидак Cu , Ni , CuO , ZnO , TiO_2 , MoS_2 , h-BN , $\text{TiO}_2@(\text{SiO}_2)$, $\text{Cu}@(\text{SiO}_2)$ [4].

Можливості інноваційних наноприсидак для безрозбірного сервісу автомобілів. Особливе значення мають мастильні матеріали з наноприсидаками, що застосовуються в процесі безрозбірного ремонту й відновлення трибосполучень.

Наноприсидаки для безрозбірного сервісу – це багатофункціональні наноприсидаки в оливах для відновлення зношених металевих поверхонь тертя деталей і вузлів автомобіля та збільшення моторесурсу деталей автомобіля. Наноприсидаки запобігають утворенню задирів, скорочують зношування й шум.

Безрозбірний сервіс (*Smart self Technology*) – це новий напрям у технології ремонту автомобілів, який є комплексом робіт з технічного обслуговування й поточного ремонту вузлів і механізмів без розбирально-складальних робіт із застосуванням нових мастильних матеріалів із наноприсадками.

Безрозбірний сервіс передбачає ресурсозберігальні технології обкатки (приробітку), діагностики, профілактики, відновлення агрегатів і вузлів техніки в процесі їх безперервної експлуатації.

Теоретичну основу технологій безрозбірного сервісу вузлів і механізмів становлять теорія дисипативних структур, явище виборчого переносу під час тертя, ефект беззносності, ефект пластифікації поверхонь, ефект аномально низького тертя твердих тіл. Унаслідок проведених досліджень було встановлено, що основною причиною тертя є адгезійний ефект, сконцентрований в найтоншому поверхневому шарі завтовшки 1,0 нм.

Наноприсадки на основі нанопорошків пластичних металів містять Cu, Al, Sn, Zn, Pb та утворюють металоплакувальні (фр. *Plaque* – покривати) покриття. Такі присадки називають металоплакувальними матеріалами, реметалізантами, чи металізантами. Механізм дії реметалізму полягає в металоплакуванні тертьових поверхонь унаслідок осадження металевих компонентів, що містяться в складі реметалізаторів у зваженому або іонному вигляді. У цьому разі частково відновлюються мікрodefekти, знижується коефіцієнт тертя, значно підвищується зносостійкість плакованих поверхонь (іноді в сотні разів). Металоплакувальні композиції поділяються на порошкові та іонні.

Основним компонентом порошкових препаратів є ультрадисперсні (нанорозмірні) порошки, а іонних – повністю оливорозчинні солі пластичних металів, органічні кислоти, мила жирних і нафтових кислот, жирні аміді, ефіри жирних кислот і спиртів, а також гліцерин.

Наноприсадки на основі нанорозмірних порошків полімерів можуть містити політетрафторетилен (ПТФЕ, тефлон), перфторполіефір карбонової кислоти, фторопласт-4, перфторпропіленоксид [8–11, 28].

Присадки називають полімеровмісними матеріалами, або тефлоновими препаратами. У процесі оброблення вузлів тертя поверхні деталей покриваються політетрафторетиленом, що замінює тертя метал – метал тертям полімер – полімер. Це дає змогу збільшити

терміни експлуатації техніки, зменшити витрати палива й мастильних матеріалів.

Наноприсадки на основі металокерамічних наносполук містять нанорозмірні комплекси природних і синтетичних металокерамічних сполук, рідкісноземельних нанокаталізаторів і нанографіту [8–11]. Такі наноприсадки мають різні назви: металокерамічні матеріали для відновлення деталей автомобілів, геомодифікатори чи геоактиватори, ремонтно-відновлювальні склади (РВС-технології) або ревіталізанти. Відновлення та зміцнення рухомих з'єднань вузлів автомобілів наноприсадками на основі металокерамічних сполук здійснюється внаслідок формування на поверхнях тертя структур підвищеної міцності, зменшення швидкості процесів водневого зношування та крихтування металу, підвищення термодинамічної стійкості системи «поверхня тертя – мастильний матеріал». Поверхнево-активні речовини (ПАР), що містяться в складі композиції, після введення їх у системи двигуна готують поверхні тертя хімічно (каталіз) та фізично (суперфініш), очищаючи від нагару, оксидів і відкладень. Потрапляючи на поверхні тертя разом з оливою або у складі пластичного мастила, ПАР ініціюють процес формування металокерамічного покриття з високою зносостійкістю й малим коефіцієнтом тертя.

Наноприсадки для безрозбірного сервісу на основі наноалмазів містять частинки алмазів, які об'єднані в агрегати розміром до 100 нм. Наноалмази можна отримувати способом детонації вуглецевих вибухових речовин в інертній атмосфері. Алмазовмісні мастильні композиції мають високі антифрикційні, протизносні та протизадирні властивості поряд з високою колоїдною стабільністю [8–11]. Тому наноприсадки на основі наноалмазів застосовують для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості поверхонь тертя. Вміст наночастинок у робочому середовищі в незначних кількостях (0,01...0,003 %) забезпечує м'яку безабразивний приробіток деталей двигунів і трансмісій. Препарати на основі наноалмазів змінюють реологічні властивості оливи й реалізують безабразивний трибохімічний приробіток не внаслідок сколювання та руйнування мікрошорсткості поверхонь тертя, а за допомогою пластифікування, деформування (вдавлення) та наклепу мікровиступів шорсткості поверхні. У процесі обкатування застосування наноприсадок забезпечує економію палива до 8 %, моторної оливи – до 10 %, а

також зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище.

Наноприсадка із сучасними наноконпонентами NanoJell-C – суміш наноалмазів (діаметром 4...6 нм) та наночастинок політетрафторетилену з підвищеною поверхневою енергією, що містяться в оливі у вигляді нанокапсул, – під час роботи двигуна утворює на металевих поверхнях стійку до стирання за температури до 500 °C плівку, яка рівномірно заповнює всі нерівності на поверхні металу, знижуючи втрати на тертя та захищаючи поверхні тертя від зносу.

Наноприсадка для підвищення ресурсу й покращення експлуатаційних показників агрегатів трансмісії автомобіля містить сучасні наноконпоненти NanoJell-Mo (дисперсія наноалмазів, наночастинок політетрафторетилену в складних поліефірах та молібденових сполуках), які формують на поверхнях тертя захисну наноструктуровану плівку, що знижує втрати на тертя та знос деталей трансмісії.

Наноприсадки на основі фулеренів містять фулерени (англ. *Fullerene*) – молекулярні форми вуглецю з можливою кількістю атомів від 20 до 940, розташованих у вершинах багатокутників, що утворюють сферу.

Наявність фулеренів у присадках до мастильних матеріалів ініціює на поверхнях тертя утворення захисної фулереново-полімерної плівки завтовшки 100 нм. Утворена плівка захищає поверхні деталей машин від термічної та окисної деструкції, збільшує термін експлуатації вузлів тертя в аварійних ситуаціях у 3...8 разів, несну здатність вузлів тертя – у 2...3 рази, розширює робочий інтервал тисків вузлів тертя у 1,5...2 рази.

Однією з перших наноприсадок був препарат *Energy Release* (виробник *Energy Release Products Corp*), розроблений для вузлів і механізмів, що працюють у важких умовах, в яких мастильні матеріали не забезпечують необхідний рівень мастильних властивостей. На поверхнях трибосполучень, оброблених цією наноприсадкою, утворюється плівка завтовшки 250 Å, на поверхні якої встановлюється динамічна рівновага між атомами заліза самої плівки й перехідними комплексами продукту *Energy Release* в складі моторної оливи. Унаслідок оброблення процес тертя відбувається за замкненим циклом: зношування – відновлення трибоповерхні. Оброблення наноприсадкою *Energy Release* двигуна автомобіля зменшує шорсткість поверхонь деталей до 0,01 мкм і знос деталей двигуна в 5 разів. Недоліком препа-

рату *Energy Release* є можливість його осадження на дно поршнів та інших деталей за умови тривалої відсутності експлуатації. Осадження препарату може бути викликане концентрацією препарату в оливі – приблизно 6 %, а також відмінністю складу домішок у вітчизняних і європейських оливах від американських оливи.

Препарат *Super Dura Lube*, розроблений у США в лабораторії NASA для турбін реактивних двигунів, вузлів та механізмів, що працюють у важких умовах, містить синтетичні матеріали та ПАР. Оброблення препаратом тертьових поверхонь вузлів і механізмів автомобілів призводить до утворення на них захисного шару завтовшки 20...40 нм, стійкого до високих навантажень і антифрикційних властивостей. За рекомендаціями виробника одне оброблення препаратом *Super Dura Lube* розраховано на 1000 км пробігу автомобіля.

Широке практичне застосування мають американські препарати *Traitement Pour Moteurs* (виробник *STP Corp*) і *Micro X2* (виробник *Micro X2 Corporation*). Препарат *Traitement Pour Moteurs* має у своєму складі хімічну сполуку XeF_2 , яка є композицією протизносних, антиокислювальних та антикорозійних наноприсадок. Додавання препаратів до моторних оливи дає змогу збільшити термін експлуатації двигуна автомобіля удвічі.

Наноприсадки застосовуються в мастильних матеріалах для трансмісій, елементів підвісок і кермового керування автомобілів. Широко використовується високоефективна літєва олива *Hi-Speed Litium* (G 100), призначена для змащування колісних підшипників, і термостійка синтетична олива *Hi-Temp Synthetic Complex* (G 200) для деталей трибосполучень, що працюють за високих навантажень і температур.

Наноприсадка до оливи *NanoVit Motor Renovator* є нанодисперсними порошками розміром 14 нм діоксиду кремнію SiO_2 , триоксиду алюмінію Al_2O_3 і графіту, які додаються в базову моторну оливу (наприклад, SAE 10W-40) в концентрації 0,001...0,002 %. Наноприсадка захищає двигун від зносу, має мийні властивості, оптимізує потужність двигуна, знижує викид шкідливих речовин.

Отже, застосування наноприсадок до мастильних матеріалів для безрозбірного ремонту зменшує коефіцієнт тертя до значень 0,01...0,001; знижує швидкість зношування деталей (наприклад, швидкість зношування поршневих кілець зменшується втричі, а вкладишів підшипників колінчастого вала –

уп'ятеро); зменшує механічні втрати двигуна на 20...30 %; підвищує потужність двигуна; відновлює компресію в циліндрах; зменшує витрату палива до 10 %; забезпечує легкий пуск двигуна за мінусових температур навколишнього середовища; збільшує термін експлуатації двигуна й трансмісії удвічі; підвищує маслоутримувальну здатність поверхонь тертя; збільшує термін експлуатації оливи удвічі; усуває шум і вібрації у вузлах трансмісії; знижує токсичність вихлопних газів у 2...4 рази.

Нині на розроблення наноматеріалів спрямовані основні зусилля таких всесвітньо відомих компаній, як *Mobil, Shell, Castrol, British Petroleum, Neste, Comma, Total* та ін.

Вибір і застосування наноприправок до мастильних матеріалів для безрозбірного ремонту визначається технічним станом автомобіля. Необхідність тієї чи іншої дії оцінюється на основі результатів технічного діагностування. За результатами діагностування призначаються профілактичні препарати або препарати, що забезпечують інтенсивний вплив на поверхні тертя деталей автомобілів.

Проблеми й тенденції розвитку наноприправок до мастильних матеріалів. Незважаючи на значні досягнення в створенні наноприправок до мастильних матеріалів, існують певні проблеми, а саме:

- складність контролю структури й розміру частинок, що не забезпечує достатньої однорідності наноматеріалів у процесі виробництва;

- складність експериментального підтвердження реальних процесів у наноприпрадках, і, як наслідок, недостатнє розуміння механізмів дії наноприправок на процеси тертя й зношування;

- нестабільність дисперсії, яка в умовах експлуатації може призводити до закупорювання фільтрів і нерівномірного розподілу присадок у системі;

- сумісність наноприправок із базовими оливами й традиційними присадками, яка потребує розроблення експлуатації або ремонту автомобілів;

- економічні аспекти, пов'язані з високою вартістю виробництва наноприправок;

- екологічні аспекти, які потребують дослідження впливу наноприправок на здоров'я людини й навколишнє середовище.

Проведений в роботі аналіз дає змогу визначити такі перспективні напрями розвитку наноприправок до автомобільних мастильних матеріалів:

- створення наноструктур для конкретних умов тертя, що потребує вдосконалення ная-

вних технологій (золь-гель технологій, осадження тощо) і методів контролю й розроблення нових технологій виробництва й контролю;

- підвищення стабільності дисперсії можливе способом розроблення високостабільних нанодобавок, нанокompозитів;

- розроблення адаптивних («розумних») наноприправок, які будуть здатні змінювати структуру й властивості залежно від умов експлуатації: температури, навантаження, швидкість ковзання;

- дослідження синергетичних ефектів і створення синергетичних мастильних систем (наприклад, $\text{MoS}_2/\text{Graphene}$);

- розроблення екологічно чистих технологій, які відповідають сучасним екологічним вимогам (наприклад, створення нанодобавок на основі вуглецю, бору, кремнію, полімерних матеріалів; розроблення нанодобавок у біомастильних матеріали).

Наукова новизна й практична значущість

Проведено комплексний аналіз перспективних інноваційних наноприправок до мастильних матеріалів для експлуатації та ремонту автомобілів.

Узагальнено підходи до підвищення трибологічних властивостей мастильних матеріалів на основі наноматеріалів різного типу – металевих, вуглецевих і нанокompозитних.

Визначено важливість дисперсійної стабільності наноприправок залежно від їх розміру, форми й концентрації.

Схарактеризовано п'ять основних механізмів змащування з нанодобавками: формування трибоплівки, ефект підшипника кочення, трансформація мікроструктури, синергетичний ефект і ефект відновлення поверхні.

Обґрунтовано доцільність використання наноприправок у технологіях безрозбірного ремонту автомобілів як нового напрямку у відновленні трибосполучень.

Виокремлено тенденції розвитку наноприправок до мастильних матеріалів для експлуатації та ремонту автомобілів, які передбачають удосконалення методів диспергування, розроблення адаптивних («розумних») наноприправок, які ефективно впливатимуть на процеси тертя й зношування в умовах високих навантажень, температур, граничного тертя.

Запропонована класифікація наноприправок може бути використана для підбору оптимальних композицій мастильних матеріалів залежно від умов експлуатації.

Матеріали роботи впроваджені в навчальний процес підготовки бакалаврів спеціальності J8 «Автомобільний транспорт».

Висновки

Стрімкий розвиток науки й технологій автомобільного транспорту приводить до ускладнення конструкцій вузлів і агрегатів, посилення умов експлуатації автомобілів, що висуває нові вимоги до якості мастильних матеріалів. Традиційні присадки в мастильних матеріалах мають гарні трибологічні властивості, але містять сірку й фосфор, тому можуть спричиняти хімічну корозію, токсичність, вивільнення сульфатної золи, фосфору й сірки, забруднювати повітря.

В умовах економічної кризи й дефіциту ресурсів альтернативою традиційним присадкам до мастильних матеріалів для експлуатації та ремонту автомобілів є наноприсадки.

Робота є результатом комплексного аналізу важливих досліджень і практичних результатів створення наноприсадок до мастильних матеріалів для експлуатації та ремонту автомобілів.

У статті розглянуто склад і трибологічні властивості інноваційних присадок до мастильних матеріалів на основі металів (металеві, оксидні, сульфідні тощо), вуглецю (графен, нанотрубки, фулерен, наноалмази), а також досліджено нанокompозитні системи й присадки для безрозбірного ремонту.

Наноматеріали завдяки атомним розмірам та поверхневим ефектам демонструють унікальні хімічні, фізико-механічні та трибологічні властивості.

Серед значної кількості наноматеріалів надзвичайно актуальними й перспективними є наноприсадки на основі вуглецевих наноматеріалів і нанокompозитів.

Наноприсадки покращують трибологічні властивості мастильних матеріалів завдяки дії різних фізико-хімічних процесів. Формування трибоплівки, ефект підшипника кочення, трансформація мікроструктури, синергетичний ефект взаємодії та ефект відновлення поверхонь тертя створюють багаторівневу систему захисту поверхонь тертя, що забезпечує зменшення коефіцієнта тертя й величини зносу.

Важливим показником наноприсадок є стабільність до агломерації. Основними факторами, що впливають на дисперсійну стабільність наноприсадок, є розмір, форма й концентрація присадок у мастильних матеріалах, а також властивості базових мастильних матеріалів.

Нині існують труднощі в забезпеченні стабільності дисперсії наноприсадок до мастильних матеріалів. Це стримує широке практичне застосування інноваційних присадок до мастильних матеріалів.

Використання наноприсадок у мастильних матеріалах для безрозбірного ремонту має позитивні результати, серед яких зменшення коефіцієнта тертя до значень 0,01–0,001; зниження швидкості зношування деталей; скорочення механічних втрат двигуна на 20–30 %; зниження витрат палива до 10 %; збільшення терміну служби двигуна й трансмісії вдвічі; зростання терміну експлуатації оливи вдвічі; зниження токсичності вихлопних газів у 2–4 рази.

Економічна ефективність від використання мастильних матеріалів із наноприсадками створюється завдяки таким факторам: економія запасних частин, скорочення витрат на усунення поломок, зменшення простоїв автомобілів, підвищення зносостійкості трибосполучень, підвищення ресурсу вузлів і агрегатів автомобілів, скорочення витрат паливно-мастильних матеріалів, зниження собівартості експлуатації автомобілів.

Широке впровадження наноприсадок до мастильних матеріалів стримується проблемами, які пов'язані зі складністю контролю структури й розміру частинок, труднощами експериментального підтвердження реальних процесів у наноприсадках, нестабільністю дисперсії, сумісністю наноприсадок із базовими оливами й традиційними присадками, економічними та екологічними аспектами.

Подальші дослідження доцільно проводити в таких напрямках: створення нових наноприсадок до мастильних матеріалів для експлуатації та ремонту автомобілів, удосконалення методів диспергування, розроблення адаптивних («розумних») наноприсадок, які ефективно впливатимуть на процеси тертя й зношування в умовах високих навантажень, температур, граничного тертя.

Використання інноваційних наноматеріалів як присадок до мастильних матеріалів може не тільки значно покращити їх трибологічні властивості, але й суттєво вплинути на зменшення споживання енергії та захист навколишнього середовища.

Література

1. Олішевська В. Є., Бас К. М., Кривда В. В. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів. Практикум: навч. посіб. Дніпро: НТУ «ДП», 2025. 223 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/170985>

2. Гевко І. Б., Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Гудь В. З., Левкович М. Г., Сташків М. Я., Сіправська М. Д. Основи технології виробництва і ремонту автомобілів: навч. посіб. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 544 с.
3. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту: затв. наказом Мінітрансу України № 102 від 30.03.98 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text>
4. Zhao J., Huang Y., He Y., Shi Y. Nanolubricant additives: A review. *Friction*. 2021. 9. 891–917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8>
5. Клендій В. М., Ляшук О. Л., Гупка А. Б. Курс лекцій з дисципліни «Експлуатаційні матеріали» для студентів денної та заочної форм навчання за напрямом 6.070106 «Автомобільний транспорт». Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2016. 33 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18165/1/mater.pdf>
6. Пушка О. С., Войтік А. В. Конспект лекцій з дисципліни «Паливно-мастильні та інші експлуатаційні матеріали» призначені для студентів спеціальності 208 «Агроінженерія» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Умань: Уманський НУС, 2020. 101 с. URL: <https://pmoapv.udau.edu.ua/assets/files/2021/lekcii/pmm-lz.pdf>
7. ДСТУ 3437-96. Нафтопродукти. Терміни та визначення. [Чинний від 1997-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1997. 53 с.
8. Косенко В. А., Кушевська Н. Ф., Добровольський О. Г., Малишев В. В. Матеріалознавство та матеріали у автомобільному транспорті: навч. посіб. Київ: Університет «Україна», 2015. 313 с.
9. Буренніков Ю. А., Сивак І. О., Сухоруков С. І. Нові матеріали та композити: конспект лекцій. Вінниця: ВНТУ, 2020. Ч. 1. 135 с. URL: https://bmi.vntu.edu.ua/bioart/program/NM_lect.pdf
10. Калініна Н. Є., Носова Т. В., Мамчур С. І. Перспективні наноматеріали: навч. посіб. Дніпро: ДНУ ім. О. Гончара, 2022. 56 с. URL: <https://files.fti.dp.ua/wp-content/uploads/tainacan-items/2456/10048/perspektyvni-nanomaterialy-n-je.-kalinina-t.-v.-nosova-s.-i.-mamchur-2022.pdf>
11. Донцова Т. А., Літинська М. І., Феденко Ю. М. Нанохімія і наноматеріали: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 170 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/50b50002-b363-4f29-83da-f8bd59823fb0/content>
12. Olishevskaya V. E., Isakova M. L., Stashevskaya I. Features of molybdenum disulfide friction. *Wide-ning our Horizons: матеріали the 16th Intern. Forum for Students and Young Researchers*, м. Дніпро, 21–22 квіт. 2021 р. Дніпро, 2021. С. 236–239. URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160283>
13. Ghaednia H., Hossain M. S., Jackson R. Tribological Performance of Silver Nanoparticle–Enhanced Polyethylene Glycol Lubricants. *Tribol Transaction*. 2016. 59(4). 585–592. DOI: 10.1080/10402004.2015.1092623
14. Korkmaz M. E., Gupta M. K. Nano lubricants in machining and tribology applications: A state of the art review on challenges and future trend. *Journal of Molecular Liquids*. 2024. 407. 125261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125261>
15. Xue W. G., Zhao Z. H., Wang P., Jin Z. L., Xu X. H., Zhou X. G. Performance study of zinc oxide nanoparticles for lubricant oil. *Advanced Materials Research*. 2015. 1118. 195–204. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1118.195>
16. Sharma A. K., Tiwari A. K., Singh R. K., Dixit A. R. Tribological Investigation of TiO₂ nanoparticle based cutting fluid in machining under minimum quantity lubrication (MQL). *Materials Today: Proceedings*. 2016. 3(6). 2155–2162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.121>
17. Ghosh G. K., Panda S., Kumar N., Ghosh S. K., Kotia A., Giri J., Kanan M., Sathish T. A multi-faceted review on industrial grade nanolubricants: Applications and rheological insights with global market forecast. *Results in Engineering*. 2025. 25. 103628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103628>
18. Rengifo S., Zhang C., Harimkar S., Boesl B., Agarwal A. Effect of WS₂ addition on tribological behavior of aluminum at room and elevated temperatures. *Tribology Letters*. 2017. 65(3). 24. DOI: 10.1007/s11249-017-0856-2
19. Zhang X. H., Xu H. X., Wang J. T., Ye X., Lei W. N., Xue M. Q., Tang H., Li C. S. Synthesis of ultrathin WS₂ nanosheets and their tribological properties as lubricant additives. *Nanoscale Research Letters*. 2016. 11(1). 442. DOI: 10.1186/s11671-016-1659-3
20. Zhang B. M., Sun J. L. Tribological performances of multilayer-MoS₂ nanoparticles in water-based lubricating fluid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. 182. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/182/1/012023
21. Ky D. L. C., Khac B.-C. T., Le C. T., Kim Y. S., Chung K.-H. Friction characteristics of mechanically exfoliated and CVD-grown single-layer MoS₂. *Friction*. 2018. 6(4). 395–406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0172-8>
22. Chen L. J., Zhu D. Y. Preparation and tribological properties of unmodified and oleic acid-modified CuS nanorods as lubricating oil additives. *Ceramics International*. 2017. 43(5). 4246–4251. DOI: [10.1016/j.ceramint.2016.12.066](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.066)
23. Wang L., Gao Y., Li Z., Zhou A., Li P. Preparation and tribological properties of surface-modified ZnS nanoparticles. *Lubrication Science*. 2015. 27(4). 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1002/ls.1275>
24. Bond S., Jackson R. L., Mills G. The influence of various grease compositions and silver nanoparticle additives on electrically induced rolling-element bearing damage. *Friction*. 2024. 12(4). 796–811. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-023-0837-4>

25. Mao J. Y., Chen G. Y., Zhao J., He Y. Y., Luo J. B. An investigation on the tribological behaviors of steel/copper and steel/steel friction pairs via lubrication with a graphene additive. *Friction*. 2021. 9(2). 228–238. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0327-x>
 26. Yang J., Xia Y. F., Song H. J., Chen B. B., Zhang Z. Z. Synthesis of the liquid-like graphene with excellent tribological properties. *Tribology International*. 2017. 105. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.040>
 27. Piya A. K., Yang L., Omar A. Al Sheikh, Emami N., Morina A. Synergistic lubrication mechanism of nanodiamonds with organic friction modifier. *Carbon*. 2024. 218. 118742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118742>
 28. Kumar N., Saini V., Bijwe J. Performance properties of lithium greases with PTFE particles as additive: Controlling parameter-size or shape? *Tribology International*. 2020. 148. 106302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106302>
 29. Yang H., Li J., Zeng X. Tribological behavior of nanocarbon materials with different dimensions in aqueous systems. *Friction*. 2020. 8(1). 29–46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0235-5>
 30. Liu L., Zhou M., Jin L., Li L., Mo Y., Su G., Li X., Zhu H., Tian Y. Recent advances in friction and lubrication of graphene and other 2D materials: Mechanisms and applications. *Friction*. 2019. 7(3). 199–216. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0268-4>
 31. Jia X., Huang J., Li Y., Yang J., Song H. Mono-disperse Cu nanoparticles @ MoS₂ nanosheets as a lubricant additive for improved tribological properties. *Applied Surface Science*. 2019. 494. 430–439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.194>
 32. Song W., Yan J. C., Ji H. Fabrication of GNS/MoS₂ composite with different morphology and its tribological performance as a lubricant additive. *Applied Surface Science*. 2019. 469. 226–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.266>
 33. Wang L., Gong P., Li W., Luo T., Cao B. Mono-dispersed Ag/Graphene nanocomposite as lubricant additive to reduce friction and wear. *Tribology International*. 2020. 146. 106228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106228>
 34. Kotia A., Ghosh S. K. Experimental analysis for rheological properties of aluminium oxide (Al₂O₃)/gear oil (SAE EP-90) nanolubricant used in HEMM. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2015. 67(6). 600–605. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-03-2015-0029>
 35. Ali M. K. A., Xianjun H., Elagouz A., Essa F. A., Abdelkareem M. A. A. Minimizing of the boundary friction coefficient in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*. 2016. 18(12). 377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3679-4>
- ### References
1. Olishavska V. Ye., Bas K. M., Krivda V. V. (2025). Osnovy tekhnolohii vyrobnytstva ta remontu avtomobiliv. Praktykum. [Fundamentals of automobile production and repair technology]. Navch. posibny`k. Retrived from: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/170985> [in Ukrainian].
 2. Hevko I. B., Rohatynskyi R. M., Liashuk O. L., Hud V. Z., Levkovich M. H., Stashkiv M. Ya., Sipravska M. D. (2021). Osnovy tekhnolohii vyrobnytstva i remontu avtomobiliv. [Fundamentals of automobile production and repair technology]. Navch. posibny`k [in Ukrainian].
 3. Polozhennia pro tekhnichne obsluhovuvannia i remont dorozhnikh transportnykh zasobiv avtomobilnoho transportu [Regulations on the maintenance and repair of road vehicles of motor vehicle transport]: zatv. nakazom Mintransu Ukrainy № 102 vid 30.03.98. Retrived from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0268-98#Text> [in Ukrainian].
 4. Zhao J., Huang Y., He Y., Shi Y. (2021). Nanolubricant additives: A review. *Friction*, 9, 891–917. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0450-8>
 5. Klendii V. M., Liashuk O. L., Hupka A. B. (2016). Kurs lektsii z dystsypliny «Ekspluatatsiini materialy». [Course of lectures on the discipline «Operational materials»]. Retrived from: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18165/1/mater.pdf> [in Ukrainian].
 6. Pushka O. S., Voityk A. V. (2020). Konspekt lektsii z dystsypliny «Palyvno-mastylni ta inshi ekspluatatsiini materialy». [Lecture notes on the discipline «Fuels, lubricants and other operational materials»]. Retrived from: <https://pmoapv.udau.edu.ua/assets/files/2021/lekcii/pmm-lz.pdf> [in Ukrainian].
 7. DSTU 3437-96. (1997). Naftoprodukty. Terminy ta vyznachennia. [Petroleum products. Terms and definitions]. [in Ukrainian].
 8. Kosenko V. A., Kushchevska N. F., Dobrovolskyi O. H., Malyshev V. V. (2015). Materialoznavstvo ta materialy u avtomobilnomu transporti. [Materials science and materials in motor vehicle transport]. Navch. posibny`k [in Ukrainian].
 9. Buriennikov Yu. A., Syvak I. O., Sukhorukov S. I. (2020). Novi materialy ta kompozyty. [New materials and composites]. Konspekt lektsii. Retrived from: https://bmi.vntu.edu.ua/bioart/program/NM_lect.pdf [in Ukrainian].
 10. Kalinina N. Ye., Nosova T. V., Mamchur S. I. (2022). Perspektyvni nanomaterialy. [Promising nanomaterials]. Navch. posibny`k. Retrived from: <https://files.fti.dp.ua/wp-content/uploads/tainacan-items/2456/10048/perspektyvni-nanomaterialy-n.-ie.-kalinina-t.-v.-nosova-s.-i.-mamchur-2022.pdf> [in Ukrainian].
 11. Dontsova T. A., Litynska M. I., Fedenko Yu. M. (2021). Nanokhimiia i nanomaterialy. [Nanotechnology and nanomaterials]. Pidruchnyk. Retrived from: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/50b50002-b363-4f29-83da-f8bd59823fb0/content> [in Ukrainian].

12. Olishavska V. E., Isakova M. L., Stashevskaya I. (2021). Features of molybdenum disulfide friction. *Widening our Horizons : Materialy the 16th Intern. Forum for Students and Young Researchers (Dnipro, 21–22 kvitnya 2021)*, 236–239. Retrieved from: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160283>.
13. Ghaednia H., Hossain M. S., Jackson R. (2016). Tribological Performance of Silver Nanoparticle–Enhanced Polyethylene Glycol Lubricants. *Tribol Transaction*, 59(4), 585–592. DOI: 10.1080/10402004.2015.1092623.
14. Korkmaz M. E., Gupta M. K. (2024). Nano lubricants in machining and tribology applications: A state of the art review on challenges and future trend. *Journal of Molecular Liquids*, 407, 125261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125261>
15. Xue W. G., Zhao Z. H., Wang P., Jin Z. L., Xu X. H., Zhou X. G. (2015). Performance study of zinc oxide nanoparticles for lubricant oil. *Advanced Materials Research*, 1118, 195–204. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1118.195>
16. Sharma A. K., Tiwari A. K., Singh R. K., Dixit A. R. (2016). Tribological Investigation of TiO₂ nanoparticle based cutting fluid in machining under minimum quantity lubrication (MQL). *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 2155–2162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.04.121>
17. Ghosh G. K., Panda S., Kumar N., Ghosh S. K., Kotia A., Giri J., Kanan M., Sathish T. (2025). A multi-faceted review on industrial grade nanolubricants: Applications and rheological insights with global market forecast. *Results in Engineering*, 25, 103628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103628>
18. Rengifo S., Zhang C., Harimkar S., Boesl B., Agarwal A. (2017). Effect of WS₂ addition on tribological behavior of aluminum at room and elevated temperatures. *Tribology Letters*, 65(3), 24. DOI: 10.1007/s11249-017-0856-2
19. Zhang X. H., Xu H. X., Wang J. T., Ye X., Lei W. N., Xue M. Q., Tang H., Li C. S. (2016). Synthesis of ultrathin WS₂ nanosheets and their tribological properties as lubricant additives. *Nanoscale Research Letters*, 11(1), 442. DOI: 10.1186/s11671-016-1659-3
20. Zhang B. M., Sun J. L. (2017). Tribological performances of multilayer-MoS₂ nanoparticles in water-based lubricating fluid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 182, 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/182/1/012023
21. Ky D. L. C., Khac B.-C. T., Le C. T., Kim Y. S., Chung K.-H. (2018). Friction characteristics of mechanically exfoliated and CVD-grown single-layer MoS₂. *Friction*, 6(4), 395–406. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0172-8>
22. Chen L. J., Zhu D. Y. (2017). Preparation and tribological properties of unmodified and oleic acid-modified CuS nanorods as lubricating oil additives. *Ceramics International*, 43(5), 4246–4251. DOI: [10.1016/j.ceramint.2016.12.066](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.066)
23. Wang L., Gao Y., Li Z., Zhou A., Li P. (2015). Preparation and tribological properties of surface-modified ZnS nanoparticles. *Lubrication Science*, 27(4), 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1002/ls.1275>
24. Bond S., Jackson R. L., Mills G. (2024). The influence of various grease compositions and silver nanoparticle additives on electrically induced rolling-element bearing damage. *Friction*, 12(4), 796–811. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-023-0837-4>
25. Mao J. Y., Chen G. Y., Zhao J., He Y. Y., Luo J. B. (2021). An investigation on the tribological behaviors of steel/copper and steel/steel friction pairs via lubrication with a graphene additive. *Friction*, 9(2), 228–238. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0327-x>
26. Yang J., Xia Y. F., Song H. J., Chen B. B., Zhang Z. Z. (2017). Synthesis of the liquid-like graphene with excellent tribological properties. *Tribology International*, 105, 118–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.040>
27. Piya A. K., Yang L., Omar A. Al Sheikh, Emami N., Morina A. (2024). Synergistic lubrication mechanism of nanodiamonds with organic friction modifier. *Carbon*, 218, 118742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118742>
28. Kumar N., Saini V., Bijwe J. (2020). Performance properties of lithium greases with PTFE particles as additive: Controlling parameter-size or shape? *Tribology International*, 148, 106302. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2020.106302>
29. Yang H., Li J., Zeng X. (2020). Tribological behavior of nanocarbon materials with different dimensions in aqueous systems. *Friction*, 8(1), 29–46. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0235-5>
30. Liu L., Zhou M., Jin L., Li L., Mo Y., Su G., Li X., Zhu H., Tian Y. (2019). Recent advances in friction and lubrication of graphene and other 2D materials: Mechanisms and applications. *Friction*, 7(3), 199–216. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40544-019-0268-4>
31. Jia X., Huang J., Li Y., Yang J., Song H. (2019). Monodisperse Cu nanoparticles @ MoS₂ nanosheets as a lubricant additive for improved tribological properties. *Applied Surface Science*, 494, 430–439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.194>
32. Song W., Yan J. C., Ji H. (2019). Fabrication of GNS/MoS₂ composite with different morphology and its tribological performance as a lubricant additive. *Applied Surface Science*, 469, 226–235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.10.266>
33. Wang L., Gong P., Li W., Luo T., Cao B. (2020). Mono-dispersed Ag/Graphene nanocomposite as lubricant additive to reduce friction and wear. *Tribology International*, 146, 106228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106228>
34. Kotia A., Ghosh S. K. (2015). Experimental analysis for rheological properties of aluminium oxide (Al₂O₃)/gear oil (SAE EP-90) nanolubricant used in HEMM. *Industrial Lubrication and Tribology*,

67(6), 600–605. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-03-2015-0029>

35. Ali M. K. A., Xianjun H., Elagouz A., Essa F. A., Abdelkareem M. A. A. (2016). Minimizing of the boundary friction coefficient in automotive engines using Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 18(12), 377. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3679-4>

Олішевська Валентина Євгенівна, канд. техн. наук, доц. кафедри автомобільного транспорту, тел. +38 099 3668845, е-mail: olishevska.v.ye@nmu.one;

Абрамчук Федір Іванович, д-р техн. наук, проф. кафедри автомобільного транспорту, тел. +38(050)5249512, е-mail: abramchuk.f.i@nmu.one;

Олішевський Геннадій Сергійович, канд. техн. наук, доц. кафедри електроенергетики, тел. 38 (095) 56 51 830, е-mail: olishevskiyi.h.s@nmu.one;

Іванова Ганна Павлівна, канд. техн. наук, доц. кафедри будівництва, геотехніки та геомеханіки, тел. +38 050 45 29 945, е-mail: ivanova.h.p@nmu.one;

Гаєк Євген Анатолійович, канд. техн. наук, доц. кафедри автомобільного транспорту, тел. +38(099)3573784, е-mail: Haiek.Ye.A@nmu.one.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 49005, Україна, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19.

Innovative additives to lubricants for vehicle operation and repair

Abstract Problem. Lubricant additives have good tribological properties, but can cause chemical corrosion, toxicity, release of sulfated ash, phosphorus and sulfur, and air pollution. **Goal.** The goal is to review and systematize promising innovative additives to lubricants for the operation and repair of automobiles, as well as analyze current trends in their development. **Methodology.** The following research methods were used in the work: theoretical research (classification, systematization), analysis and generalization of known scientific results, empirical methods (comparison, observation). **Results.** The work analyzes the composition and tribological properties of innovative additives to lubricants for the operation and repair of automobiles. The importance of the dispersion stability of nanoadditives is considered, and lubrication mechanisms are characterized. The use of nanoadditives in lubricants for non-disassembly repair allows reducing the friction

coefficient to values of 0.01...0.001, mechanical losses of the engine – by 20...30%, fuel consumption – up to 10%. Economic efficiency from the use of lubricants with nanoadditives is created by saving spare parts and increasing the wear resistance of tribo-combinations. **Originality.** A comprehensive analysis of promising innovative nanoadditives in lubricants for the operation and repair of automobiles has been conducted. Approaches to improving the tribological properties of lubricants based on various types of nanomaterials – metallic, carbon and nanocomposite – have been summarized. The main mechanisms of lubrication with nanoadditives have been characterized: tribofilm formation, rolling bearing effect, microstructure transformation, synergistic effect and surface restoration effect. The feasibility of using nanoadditives in non-disassembly automobile repair technologies has been substantiated. **Practical value.** Trends in the development of nanoadditives for lubricants for the operation and repair of automobiles are highlighted. The proposed classification of nanoadditives can be used to select optimal compositions of lubricants depending on operating conditions. The materials of the work are implemented in the educational process of training bachelors in the specialty J8. **Key words:** nanomaterials, innovative additives, dispersion stability, tribological properties, lubrication mechanism, non-disassembly repair.

Olishevska Valentyna, PhD, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Transport, ORCID: [0000-0002-3098-1351](https://orcid.org/0000-0002-3098-1351), е-mail: olishevska.v.ye@nmu.one;

Abramchuk Fedir, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Motor Vehicle Transport, ORCID: [0000-0001-7430-7484](https://orcid.org/0000-0001-7430-7484), е-mail: abramchuk.f.i@nmu.one

Olishevskiyi Hennadii, Ph.D., Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering, ORCID: [0000-0001-9576-7527](https://orcid.org/0000-0001-9576-7527), е-mail: olishevskiyi.h.s@nmu.one,

Ivanova Hanna, PhD, Associate Professor of the Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, ORCID: [0000-0003-4219-7916](https://orcid.org/0000-0003-4219-7916), е-mail: ivanova.h.p@nmu.one,

Haiek Yevhen, Ph.D, Associate Professor of the Department of Motor Vehicle Transport, ORCID: [0000-0001-7470-9918](https://orcid.org/0000-0001-7470-9918), е-mail: Haiek.Ye.A@nmu.one.

Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine.